

# SOMMAIRE

<b>1 Cadre de l'étude .....</b>	<b>7</b>
1.1 Contexte de l'étude.....	7
1.2 Objectif de l'étude.....	7
1.3 Localisation géographique de la zone d'étude.....	8
1.4 Contenu de l'étude .....	9
<b>2 Synthèse de la problématique des extractions en lit majeur Bibliographie .....</b>	<b>11</b>
2.1 Notes préliminaires .....	11
2.1.1 Définitions .....	11
2.1.2 Types d'effets .....	12
2.2 Hydraulique de surface .....	13
2.3 Synthèse bibliographique .....	17
<b>3 Caractéristiques des secteurs étudiés.....</b>	<b>19</b>
3.1 Choix des secteurs retenus .....	19
3.2 Contexte hydrologique .....	20
3.2.1 Hydrologie à Marmande .....	20
3.2.2 Hydrologie en aval de Toulouse .....	21
3.3 Contexte morphologique.....	22
3.3.1 Morphologie du secteur de Marmande.....	22
3.3.2 Morphologie du secteur en aval de Toulouse .....	24
<b>4 Modélisation hydraulique .....</b>	<b>27</b>
4.1 Aspects calculatoires .....	27
4.1.1 Logiciel utilisé .....	27
4.2 Paramétrage et structure des modèles.....	28
4.2.1 Coefficients de frottement et calage.....	28
4.2.2 Structure des modèles de terrain (singularités, casiers).....	29
4.2.3 Conditions aux limites - Régime transitoire .....	31
4.3 Grandeurs caractéristiques utilisées pour la synthèse des valeurs numériques .....	31
4.3.1 Niveaux de crue .....	31
4.3.2 Volume d'écrêtement stocké en fin de crue .....	32
4.3.3 Paramètres de forme des hydrogrammes .....	33

<b>5 Scénarios et hypothèses de calcul.....</b>	<b>35</b>
5.1 Etats d'exploitation du fond de vallée.....	35
5.1.1 Cinq scénarios modélisés .....	35
5.1.2 Répartition surfacique des secteurs d'exploitation .....	36
5.2 Conditions initiales .....	38
<b>6 Analyse et interprétation des résultats .....</b>	<b>39</b>
6.1 Secteur de Marmande .....	39
6.1.1 Analyse qualitative et interprétation.....	39
6.1.2 Tableau de synthèse des résultats numériques.....	40
6.1.3 Analyse quantitative des résultats de simulation.....	40
6.1.4 Synthèse des efftes constatés sur le secteur de Marmande .....	47
6.2 Secteur en aval de Toulouse.....	48
6.2.1 Description qualitative de l'évolution des inondations.....	48
6.2.2 Tableau de synthèse des résultats numériques.....	48
6.2.3 Analyse quantitative des résultats de simulation.....	50
6.2.4 Synthèse des efftes constatés sur le secteur en aval de Toulouse.....	56
6.3 Essais d'extrapolation des résultats .....	57
6.3.1 Introduction .....	57
6.3.2 Secteur de Marmande.....	58
6.3.3 Secteur en aval de Toulouse .....	59
<b>7 Conclusion .....</b>	<b>63</b>

# ANNEXES

---

- Annexe 1 Carte de localisation générale des secteurs d'étude.
- Annexe 2 Ajustement statistique des volumes et des débits de pointe de la Garonne à Marmande et Toulouse
- Annexe 3 Vues en plan du secteur de Marmande et du secteur en aval de Toulouse
- Annexe 4 Hydrogrammes issus des simulations numériques

## TABLEAUX ET FIGURES

Tableau 1	Débits et volumes statistiques de la Garonne à Marmande .....	20
Tableau 2	Débits et volumes statistiques de la Garonne à Toulouse .....	21
Tableau 3	Répartition des surfaces exploitées sur le secteur de Marmande.....	37
Tableau 4	Répartition des surfaces exploitées sur le secteur en aval de Toulouse.....	37
Tableau 5	Tableau récapitulatif des résultats numériques des modélisations du secteur de Marmande .....	41
Tableau 6	Tableau récapitulatif des résultats numériques des modélisations du secteur en aval de Toulouse.....	49
Tableau 7	Hauteur moyenne de stockage dans le fond de vallée sur la zone de Marmande.....	58
Tableau 8	Volume d'écêtement de crue sur le secteur de Marmande .....	58
Tableau 9	Hauteur moyenne de stockage dans le fond de vallée sur la zone en aval de Toulouse .....	59
Tableau 10	Volume d'écêtement de crue sur le secteur en aval de Toulouse.....	60
Tableau 11	Tableau récapitulatif des différentes simulations .....	64

---

Figure 1	Ecrêtement des crues par l'augmentation de la capacité de stockage.....	13
Figure 2	Gravières perpendiculaires au fond de vallée .....	14
Figure 3	Effets de l'endiguement .....	15
Figure 4	Risques érosifs – méthode compensatoire .....	16
Figure 5	Profil en travers type .....	27
Figure 6	Volume stocké dans les gravières .....	57



# Cadre de l'étude

## 1.1 Contexte de l'étude

Le Ministère de l'Environnement a récemment mis en cause l'exploitation de sites d'extraction de matériaux en lit majeur dans les désordres hydrauliques qui perturbent aujourd'hui les fonds de vallées lors des grands écoulements. La mise en place de gravière est principalement visée, pour l'interaction de ses effets en période de crue avec les sites en amont et en aval.

A ce titre, le ministère souhaite créer prochainement une nouvelle redevance sur l'activité des exploitants de sables et graviers en lit majeur des cours d'eau et des fleuves, au motif de « modification du régime des eaux ».

## 1.2 Objectif de l'étude

Le Comité National de la Charte des Professionnels de l'Industrie des Granulats estime qu'au jour d'aujourd'hui, les arguments avancés par le Ministère de l'Environnement concernant la modification du régime des eaux sont peu fondés et non-étayés scientifiquement. La profession a donc engagé une série d'études sur les gravières des différents bassins hydrographiques français. L'objectif global de ces études est d'apporter des arguments quantitatifs et qualitatifs, qui devront permettre de juger :

- a) En quoi les extractions sont-elles susceptibles de « modifier le régime des eaux »,
- b) Quelles crues sont préférentiellement « modifiées » : périodes de retour, volumes, effets de cette « modification ».

Dans le cadre de cette action générale, les Comités Régionaux de la Charte de Midi Pyrénées et d'Aquitaine ont commandé au département Hydraulique Fluviale de SAFEGE, une étude du régime d'écoulement des eaux en crue dans des fonds de vallées partiellement occupés par des gravières. La réflexion est basée sur la modélisation mathématique de deux secteurs du grand Sud Ouest

(Midi Pyrénées et Aquitaine) d'une longueur de quinze à vingt kilomètres. Les régions Aquitaine et Midi Pyrénées permettent en effet d'illustrer cette problématique puisqu'on y note la présence de carrières en lit majeur de la Garonne, déjà largement étudiées et pour laquelle on dispose d'informations topographiques nécessaires à la modélisation (bathymétrie du lit mineur, topographie du lit majeur). De plus, l'historique des crues du fleuve a été particulièrement bien suivi, tant au niveau des stations hydrologiques (enregistrement des débits en continu) qu'au niveau des champs d'expansion des inondations (témoignages écrits, photos ...) notamment recensés dans la « Monographie des crues de la Garonne » (SMEAG février 1989).

Ainsi cette étude s'organise essentiellement autour :

- d'une recherche bibliographique générale sur les effets potentiels des gravières vis à vis des écoulements en fond de vallée,
- de la modélisation numérique de la Garonne en deux secteurs, d'une énumération des effets observables sur les résultats des simulations (comparaison de trois scénarios d'aménagement représentatifs de trois niveaux différents d'exploitation –sans exploitation, exploitation moyenne et exploitation intensive-) et de leur synthèse et classification en fonction de leur caractère vis à vis des inondations.

L'étude réalisée dans un souci d'objectivité, doit déterminer en quoi les extractions sont-elles susceptibles d'influencer les crues et de modifier le régime d'écoulement des eaux de surface.

### **1.3 Localisation géographique de la zone d'étude**

Le choix des secteurs modélisés qui suivent, a été retenu à la suite d'une enquête réalisée auprès des services détenteurs de données (notamment topographiques). Les critères de sélection pour ce choix ont été :

- la représentativité générale du site par rapport au reste de la vallée (présence ou potentialité de site d'extraction de granulats, présence d'une plaine inondable),
- l'existence et la disponibilité de données suffisamment détaillées pour être exploitées.

Les secteurs ainsi retenus sont les suivant :

- Secteur situé au droit de Marmande

La bathymétrie du lit de la rivière et la topographie de la plaine inondable disponibles s'étendent entre Fourques-sur-Garonne et Couthures-sur-Garonne, sur un linéaire d'une quinzaine de kilomètres.



- Secteur situé en aval de Toulouse

La bathymétrie et du lit de la rivière et la topographie de la plaine inondable disponibles s'étendent entre Gagnac-sur-Garonne et Grisolles-sur-Garonne, sur un linéaire d'une vingtaine de kilomètres.

## 1.4 Contenu de l'étude

Le présent rapport est divisé en 6 parties brièvement synthétisées ci-dessous :

- La synthèse de la problématique des extractions en lit majeur :

Une synthèse générale sur le thème des interactions entre les sites d'extraction et l'hydraulique de surface est réalisée. Elle aborde les thèmes relatifs à l'hydraulique de surface ainsi que les thèmes relatifs aux aspects géomorphologiques.

- La description des caractéristiques des secteurs étudiés :

Cette description aborde les thèmes de l'hydrologie et de la géomorphologie de chacun des secteurs, ainsi que l'origine des données de base.

- La modélisation hydraulique :

Les aspects calculatoires de la description du milieu physique y sont traités ainsi que l'interprétation de résultats types et leur signification. Puis, la phase initiale de calage et de paramétrage des modèles est décrite.

- Les différents scénarios modélisés et les hypothèses de calcul :

Les différents scénarios d'aménagement envisagés sont abordés. De plus les hypothèses nécessaires à la mise en œuvre de la modélisation y sont décrites.

- L'analyse et l'interprétation des résultats :

L'analyse et l'interprétation des résultats numériques spécifiques à chacun des sites sont présentées.

- La synthèse et la conclusion sur les résultats obtenus :

Ce paragraphe s'attache à reformuler les résultats et leurs limites sous une forme généralisable à d'autres secteurs d'exploitation de granulats en plaine inondable présents sur la couverture géographique concernée.



# Synthèse de la problématique des extractions en lit majeur Bibliographie

## 2.1 Notes préliminaires

### 2.1.1 Définitions

Les paragraphes qui suivent sont une issue d'une synthèse bibliographique énumérant les effets pressentis ou constatés de l'extraction de granulats en lit majeur sur les crues.

Dans la suite de ce rapport, on appelle :

- lit mineur : le lieu des écoulements superficiels usuels hors période de crue, c'est la partie du fond de vallée toujours en eau,
- lit moyen : le lieu des écoulements superficiels occasionnels en période de crue faiblement débordante lorsque la capacité du lit mineur est insuffisante pour évacuer la totalité du débit provenant de l'amont,
- lit majeur : le lieu des écoulements superficiels plus ou moins exceptionnels en période de crue lorsque la capacité du lit mineur et du lit moyen est insuffisante pour évacuer la totalité du débit provenant de l'amont,
- aquifère : lieu des écoulements souterrains (nappe) dont le niveau est fonction de l'évolution du niveau des écoulements superficiels, des échanges se faisant via le substrat plus ou moins perméable. Le terme de nappe désigne usuellement dans ce rapport la nappe alluviale.

## 2.1.2 Types d'effets

Avant de décrire les modifications potentielles des écoulements, il est nécessaire de préciser que la plupart d'entre elles peuvent être regroupées en trois grands types génériques.

On distingue souvent l'accélération, le ralentissement ou le stockage des écoulements qu'ils soient en surface ou dans l'aquifère. Quelles qu'en soient les causes (imputables aux gravières ou non) ces trois phénomènes constituent un déplacement de tout ou partie de l'inondation d'un point vers un autre.

- l'accélération des écoulements favorise la protection de l'amont au détriment de l'aval qui reçoit plus rapidement des volumes de crues initialement étalés dans le temps
- le ralentissement des écoulements favorise la protection de l'aval au détriment de l'amont sur lequel la submersion est prolongée donc souvent amplifiée (remous vers l'amont lié à l'obstruction du passage)
- le stockage des écoulements favorise la concentration de l'inondation en un secteur réservé à cet effet (évacuation des volumes débordants vers une dépression du terrain, un secteur endigué, une nappe alluviale ...) afin de protéger les secteurs amont et aval.

***Remarque** : A travers de cette première approche, on comprend que certains effets sont qualifiés de positifs ou négatifs, en fonction du contexte local de l'occupation des sols, suivant qu'ils favorisent la protection de secteurs d'enjeux élevés (zones urbanisées, industrielles, agricoles ...) au détriment de secteurs moins valorisés (friches ...) ou l'inverse.*

## 2.2 Hydraulique de surface

Les effets décrits dans ce paragraphe sont principalement liés à la modification des formes et des caractéristiques physiques du lieu des écoulements superficiels.

### a) Capacité de stockage en lit majeur

L'excavation de matériaux en plaine inondable a pour conséquence d'augmenter la capacité de stockage de l'excédent des volumes de crue. Cette capacité de stockage est limitée par le niveau d'eau dans la gravière au moment du débordement du lit mineur vers cette dernière. Si la gravière est remplie avant le débordement (eau de ruissellement, crue de nappe ...) la capacité de stockage est annulée. Dans le cas contraire, les volumes sont stockés dans la cavité, permettant alors un écrêtement de la crue. Ce type de modification concentrant l'inondation (au moins partiellement) dans la gravière a l'avantage de réduire les effets sans les reporter sur l'amont ou sur l'aval. Il est vérifié dans le cas des crues courantes, faiblement débordantes. Cet aspect est cependant à nuancer dans le cas des crues plus rares et fortement débordantes. Les volumes mis en jeu sont plus importants et le pourcentage de volume stocké dans la gravière peut devenir négligeable, d'autant que le stockage n'intervient pas forcément au moment du pic de crue (Figure 1).

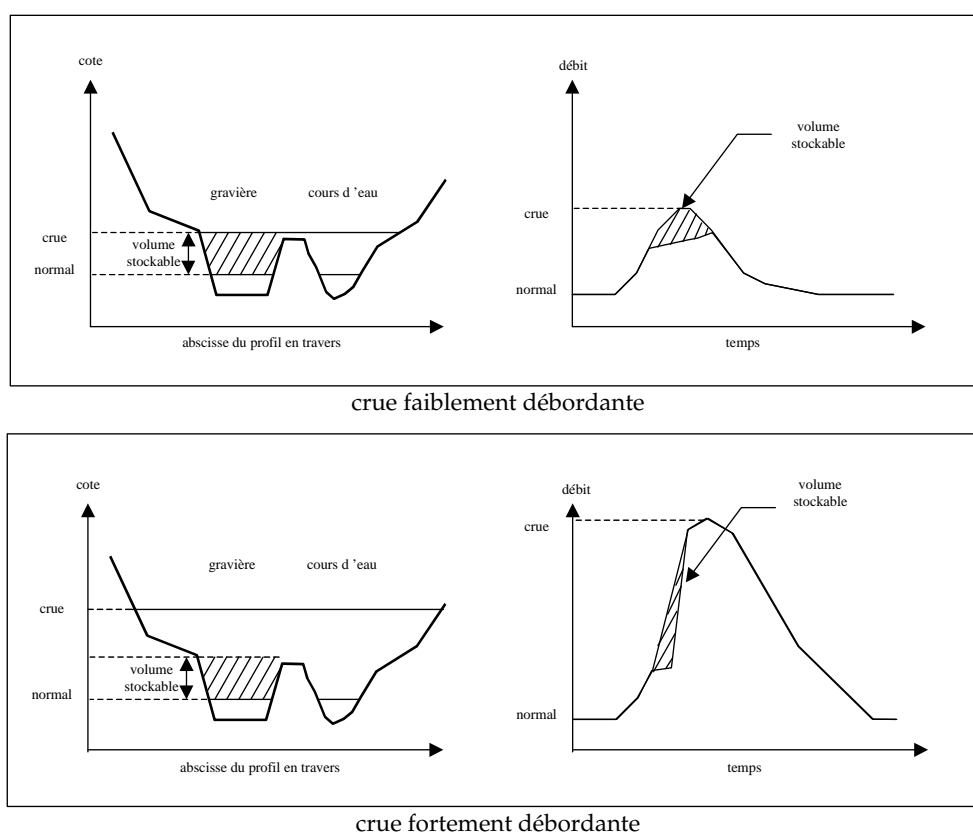


Figure 1 Ecrêtement des crues par l'augmentation de la capacité de stockage

*Remarque :* On notera que pour ces schémas explicatifs, les proportions ont été volontairement exagérées.

## b) Débitance du fond de vallée – disposition et forme des gravières

La débitance (ou capacité à évacuer un débit pour une hauteur d'eau donnée) du fond de vallée est augmentée d'une part par l'augmentation de la section de passage au droit du site d'exploitation et d'autre part par la réduction de la rugosité (liée à la présence d'aspérités en lit majeur telles que la végétation ...)

L'augmentation du débit capacitif du fond de vallée au droit du site a donc tendance à accélérer les écoulements de crue lorsqu'ils sont débordants.

L'augmentation de la débitance du fond de vallée peut cependant être atténuée par la disposition des sites d'extraction en une série de creusements axés perpendiculairement au fond de vallée.

La mise en place de gravières aux formes irrégulières ou allongées perpendiculairement à l'axe de la vallée et séparées chacune par une bande de terrain non modifiée ou plantée de buissons et arbustes a tendance à recréer une rugosité globale du site similaire à la situation avant aménagement (Figure 2).

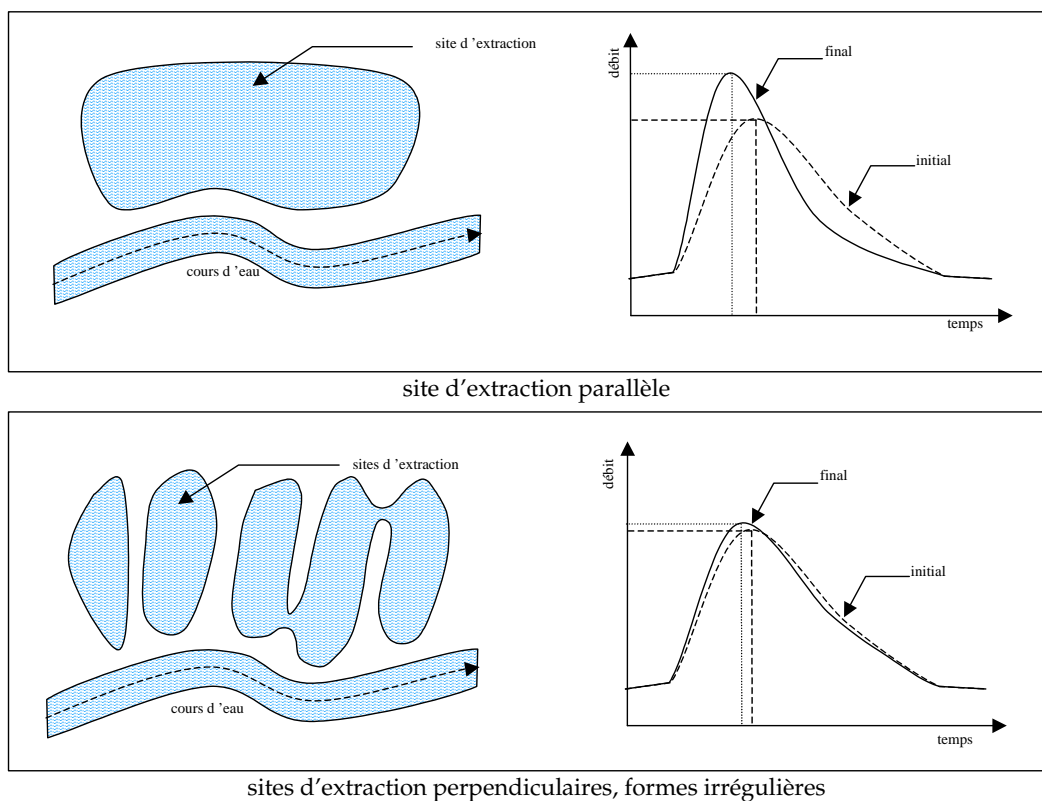


Figure 2 Gravières perpendiculaires au fond de vallée

**Remarque :** On notera que pour ces schémas explicatifs, les proportions ont été volontairement exagérées.

### c) Endiguement du secteur

L'exploitation d'un site d'extraction peut amener à la mise en place d'endigements plus ou moins importants durant l'exploitation (digues de protection pour une exploitation hors d'eau, chemin d'accès, disposition en merlons des terres de découverte ...) ou après réaménagement. Ces endiguements généralement de faible hauteur peuvent avoir des effets contradictoires localisés sur les inondations.

Des merlons ou digues disposés perpendiculairement à l'axe de la vallée peuvent ralentir le passage d'une crue ou dévier la direction de l'écoulement initial. Il est alors possible de constater localement des rehaussements de la ligne d'eau en amont ou dans les secteurs où l'écoulement a été dévié. En aval, la ligne d'eau peut être localement abaissée par la rétention et le ralentissement des écoulements.

Ces effets sont cependant à nuancer en fonction de la configuration générale du site et de leur disposition qui peut les rendre totalement « transparents » aux écoulements (Figure 3).

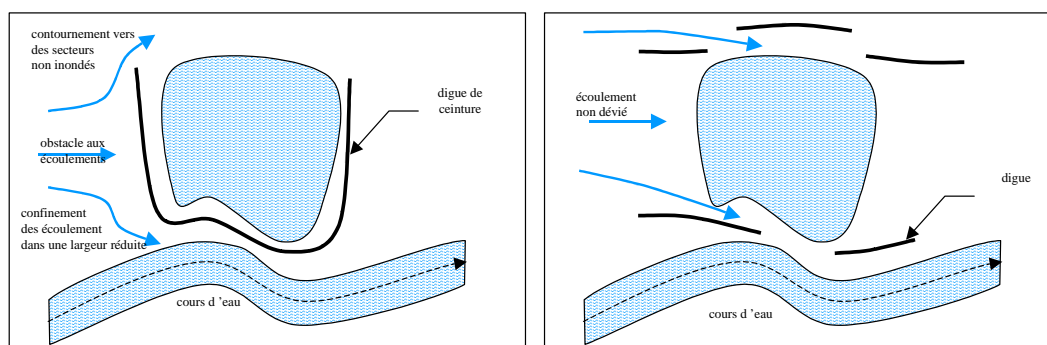


Figure 3 Effets de l'endiguement

### d) Aménagements destinés à réduire la capacité érosive

Dans le cas général, la rivière en crue déborde vers son lit majeur et vient remplir la gravière dont le niveau d'eau initial (au début du débordement) est plus bas. Ce cas de figure est réalisé lorsque les échanges gravière – cours d'eau, se faisant par le biais de la nappe, sont faibles et que le niveau de la rivière augmente plus rapidement que le niveau de nappe.

A l'instant du déversement dans la gravière, les vitesses sont d'autant plus rapides que la lame d'eau est de faible épaisseur et que la hauteur de chute (rivière – gravière) est importante. La capacité érosive croissant avec la vitesse, le risque sera maximum lors des premiers déversements.

Les conséquences d'une érosion de la bande de terre entre la gravière et le cours d'eau peuvent être une mise en communication directe des deux milieux et donc une perturbation des écoulements de surface du fond de vallée.

Les solutions destinées à remédier à ce type de risque sont :

- le respect d'une bande de terrain d'une largeur minimum fixée séparant la gravière du cours d'eau
- la mise en place de déversoirs d'équilibre solidement enrochés qui permettent un déversement dans la gravière avec une hauteur de chute réduite et un pré-remplissage avant le débordement généralisé du cours d'eau.

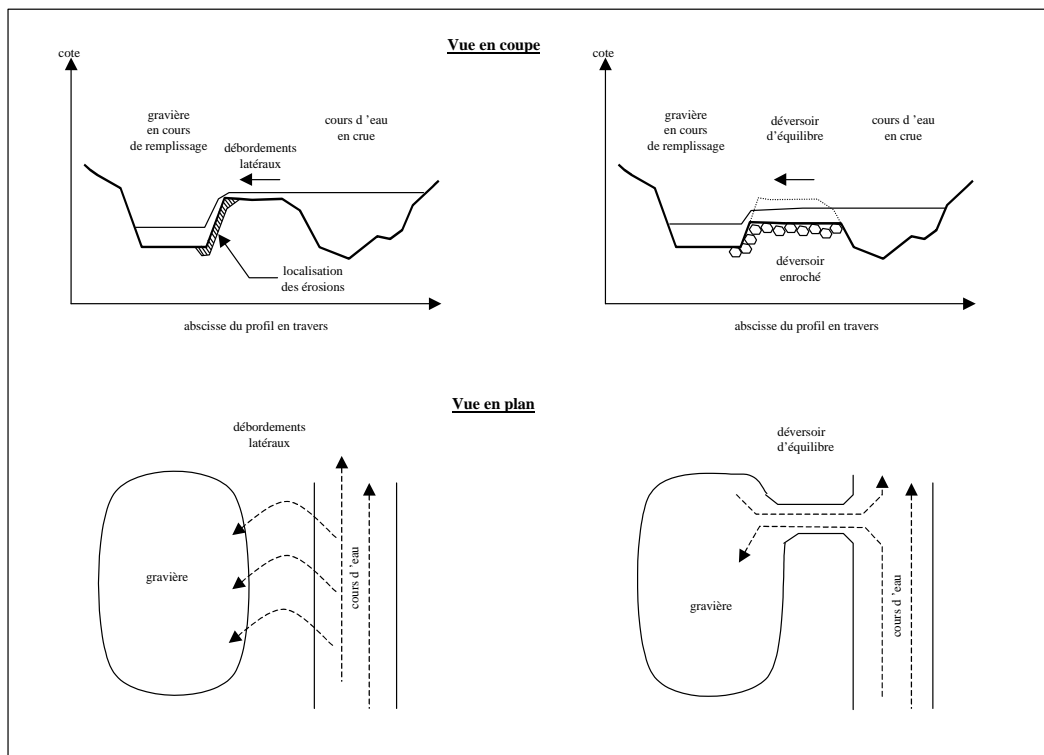


Figure 4 Risques érosifs – méthode compensatoire

Ces déversoirs d'équilibres reliant le cours d'eau aux gravières les plus proches peuvent avoir une influence sur les crues, le déversement vers les secteurs d'extraction se faisant pour des hauteurs (donc des débits) plus faibles qu'initialement. Ces effets se produisant en tout début de crue, ils seront davantage ressentis sur des crues de faible intensité.



## 2.3 Synthèse bibliographique

L'analyse des effets hydrauliques de l'aménagement de gravières en zone inondable permet de dégager les points suivants :

- Les effets des gravières sur la propagation des crues ne sont pas systématiques. De plus ces effets peuvent être de nature opposée (accélération de la propagation de la crue ou au contraire ralentissement de l'hydrogramme de crue par un stockage intermédiaire).
- Il apparaît que ces effets sont intimement liés au contexte local, à la morphogéologie du fond de vallée et au type de rivière et de crue.
- Il n'est donc pas possible de définir une tendance générale sur les effets des carrières alluviales par rapport au régime des eaux, pour tous types de rivière. Une approche spécifique à de grands tronçons de cours d'eau aux caractéristiques homogènes s'avère plus réaliste.

Ce type d'approche est l'objet du troisième chapitre de cette étude. Les modélisations présentées dans la suite de ce rapport permettent d'illustrer sur des cas concrets et à grande échelle, la nécessité de rechercher les effets des gravières par une approche spécifique sur des tronçons homogènes.



## Caractéristiques des secteurs étudiés

### 3.1 Choix des secteurs retenus

Les secteurs faisant l'objet de l'étude sont les suivants (voir carte de localisation générale en Annexe 1) :

- la Garonne à Marmande, entre Fourques-sur-Garonne et Couthures-sur-Garonne
- la Garonne en aval de Toulouse, entre Gagnac-sur-Garonne et Grisolles-sur-Garonne

Les critères de sélection pour ces deux secteurs ont été les suivants :

- la localisation des secteurs sur l'Adour en aval de Tarbes ou sur la Garonne en aval de Toulouse
- la représentativité des secteurs par rapport aux vallées des deux cours d'eau, notamment avec
  - la présence de sites d'extraction de façon à répondre à la problématique du présent rapport
  - le fonctionnement hydraulique des crues occupant partiellement la plaine inondable
- l'existence et la disponibilité de données topographiques, tout particulièrement la bathymétrie du lit mineur (profils en travers) et la topographie du lit majeur (semi de points cotés) nécessaires à la modélisation hydraulique.

Une enquête a donc été menée auprès des différentes entités susceptibles de détenir les informations recherchées (administrations départementales et régionales, syndicats et institutions interdépartementales, géomètres) sur les

départements de la Haute Garonne (31), du Tarn et Garonne (82), du Lot et Garonne (47), de la Gironde (33), des Hautes Pyrénées (65), du Gers (32), des Landes (40), des Pyrénées Atlantiques (64) Cette enquête a fait l'objet du rapport de Phase I en juin 1999 « Recherche de bathymétrie existante ».

## 3.2 Contexte hydrologique

Afin de reproduire le contexte hydrologique pour l'appliquer au modèle, une analyse statistique des débits et des volumes enregistrés aux stations de Marmande (station d'annonce de crue) et de Toulouse (station d'annonce de crue) a été exploitée (voir Annexe 2).

On rappelle que le débit de pointe correspond au débit maximum apparaissant durant la crue et que le volume de pointe est le cumul du débit de crue situé au-dessus d'un débit seuil.

### 3.2.1 Hydrologie à Marmande

La station de Marmande possède des enregistrements de hauteurs depuis 1846. Les débits obtenus à partir de la transformation des hauteurs par une courbe d'étalonnage ont été traités statistiquement. L'intégration des courbes de débit sur la durée de la crue donne les volumes de crues. Les résultats sont les suivants :

PERIODE DE RETOUR (années)	DEBIT DE POINTE (m <sup>3</sup> /s)	VOLUME DE POINTE (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )
Crue annuelle (1)*	2 700	500 000
Crue biennale (2)	3 300	870 000
Crue décennale (10)	5 320	2 000 000
Crue centennale (100)	7 610	3 430 000

Tableau 1 Débits et volumes statistiques de la Garonne à Marmande

\* : le débit et le volume d'une crue annuelle ne sont théoriquement pas accessibles à partir du traitement statistique présenté en Annexe 2. Ils ont donc fait l'objet d'une extrapolation sur les valeurs de période de retour faible.

Sur l'ensemble du linéaire concerné, les apports latéraux restent négligeables par rapport aux débits de la Garonne. Les débits du Trec et de l'Avance ainsi que de leurs affluents n'ont donc pas été pris en compte.

Les crues faisant références sur le secteur, sont les suivantes :

- crue de 1875 : débit de 7 900 m<sup>3</sup>/s    - crue de 1930 : débit de 7 350 m<sup>3</sup>/s
- crue de 1952 : débit de 6 900 m<sup>3</sup>/s    - crue de 1981 :débit de 6 240 m<sup>3</sup>/s

On rappelle que le bassin versant amont a une surface 52 300 km<sup>2</sup> et que la durée des crues est d'environ 14 jours.

### 3.2.2 Hydrologie en aval de Toulouse

Des enregistrements de hauteurs existent à Toulouse depuis 1827 (mesures non continues). Les débits obtenus à partir de la transformation des hauteurs par une courbe d'étalonnage ont été traités statistiquement. L'intégration des courbes de débit sur la durée de la crue donne les volumes de crues. Les résultats sont les suivants :

PERIODE DE RETOUR (années)	DEBIT DE POINTE (m <sup>3</sup> /s)	VOLUME DE POINTE (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )
Crue annuelle (1)*	1 150	125 000
Crue biennale (2)	1 700	225 000
Crue décennale (10)	3 050	480 000
Crue centennale (100)	4 730	796 000

Tableau 2 Débits et volumes statistiques de la Garonne à Toulouse

\* : le débit et le volume d'une crue annuelle ne sont théoriquement pas accessibles à partir du traitement statistique présenté en Annexe 2. Ils ont donc fait l'objet d'une extrapolation sur les valeurs de période de retour faible.

Entre Toulouse et le secteur d'étude ainsi que sur l'ensemble du linéaire concerné, les apports latéraux restent négligeables par rapport aux débits de la Garonne. Les débits de l'Aussonnelle, la Capelette, la Save, le Marguestaud en rive gauche et l'Hers en rive droite ainsi que de leurs affluents n'ont donc pas été pris en compte.

Les crues faisant références sur le secteur, sont les suivantes :

- crue de 1875 : débit de 7 000 m<sup>3</sup>/s    - crue de 1952 : débit de 4 350 m<sup>3</sup>/s
- crue de 1981 : débit de 2 700 m<sup>3</sup>/s

On rappelle que le bassin versant amont a une surface 10 000 km<sup>2</sup> et que la durée des crues est d'environ 5 jours.

**Remarque :** On peut constater que dans le cas des débits statistiques, les débits de pointe à Marmande sont environ deux fois plus élevés que les débits de pointe à Toulouse. Les raisons pour lesquelles les débits historiques (particulièrement de 1875 et 1981) ne reproduisent pas automatiquement ce rapport sont les suivantes :

- dans le cas de la crue de 1981 : il s'agit de deux crues différentes : crue de janvier 1981 à Toulouse et crue de décembre 1981 à Marmande.
- dans le cas de la crue de 1875 : la concomitance des crues (simultanéité des pics de crue) de l'Ariège et de la Garonne en amont de leur confluence portent le débit de pic de crue de la Garonne à Toulouse à sa valeur maximale.

## 3.3 Contexte morphologique

Les deux secteurs d'étude se distinguent par des caractéristiques géomorphologiques très différentes les unes des autres. (Voir cartographie en Annexe 3)

### 3.3.1 Morphologie du secteur de Marmande

La plaine inondable s'étale sur une largeur de près de 4 km, au droit et aux abords de Marmande. Les limites droite et gauche du lit majeur sont naturellement marquées par les remontées des coteaux sur lesquels viennent se percher hors d'eau, des axes de circulation tels que le canal latéral à la Garonne en rive gauche et la RN113 en rive droite. Sur ce secteur, la Garonne trace son lit en larges méandres alternant entre le côté gauche du lit majeur (Fourques, Couthures) et le côté droit (Marmande). On constate à moins de 20 km en aval du secteur d'étude, un important rétrécissement réduisant la zone inondable à 1,5 km de large en amont de la Réole. Ce verrou naturel provoque, en période de crue, un ralentissement ayant pour conséquence une remontée généralisée de la ligne d'eau (remous). En effet, jusqu'en amont de Marmande, il n'est pas possible de distinguer des secteurs inondables pour la crue décennale et non inondables pour la crue centennale, les surfaces se superposant les unes aux autres. Seules les hauteurs d'eau varient d'une crue à l'autre.

Il faut ajouter à cela la présence de nombreuses digues, construites suite à la crue de 1875, généralement destinées à la protection de terrains agricoles. Ces digues constituent un découpage du lit majeur en unités hydrauliques interdépendantes (casiers hydrauliques) dont les niveaux s'ajustent par les déversements de l'un vers l'autre. Ces digues parfois très élevées sur un linéaire important (la digue de Fourques de 5 km de long pour une hauteur d'environ 4 à 6 m est quasiment insubmersible) constituent de véritables singularités pour les écoulements de crue qui sont alors fortement modifiées (rehaussement du niveau des crues, augmentation des vitesses d'écoulement, accroissement des risques d'érosion). Les casiers hydrauliques ainsi constitués provoquent alors une inondation par remous (remplissage par l'aval) lors des fortes crues, ce type d'inondation étant moins destructeur qu'une submersion depuis l'amont « déferlant » vers l'aval du casier.

Enfin, des axes de circulation, ont été implantés transversalement aux écoulements (voie ferrée, route départementale 933). La « transparence » de ces ouvrages, surélevés par rapport au terrain naturel, n'est pas parfaite, malgré la présence de portions submersibles (route départementale), de busages, ou de franchissements plus larges (pont de la voie ferrée au-dessus de la route départementale 116 par exemple).

Le secteur de la Garonne étudié au droit de Marmande constitue donc une zone pour laquelle les écoulements en lit majeur sont caractérisés par :

- une géomorphologie singulière pour laquelle les crues inondent partiellement depuis l'aval par remous les terrains amont
- **la présence de digues et de remblais aux proportions de la vallée, totalement indépendants de l'exploitation des gravières et qui modifient le déroulement des crues de la Garonne.**

Cette configuration de fond de vallée endiguée de la Garonne est observable de la confluence Baïse – Garonne (au voisinage de Thouars) jusqu'à la confluence Dropt – Garonne (au voisinage de Castets-en-Dorthe), soit un linéaire d'environ 60 km.

On retiendra le découpage du fond de vallée suivant :

- lit mineur : lieu des écoulements réguliers de la Garonne, toujours en eau.
- lit moyen : partie du fond de vallée bordant la Garonne et contenue entre les deux digues (rive droite et rive gauche) de limitation des casiers. Il est inondé dès la crue biennale. Le lit moyen est constitué par la partie non endiguée du lit majeur proche de la Garonne.
- lit majeur : partie du fond de vallée totalement endiguée inondable (par remous) dès la crue décennale.

*Remarque : On note que le processus d'inondation est fortement dépendant de la présence des digues construites à la suite de la crue de 1875. Par souci de protection contre les inondations ces digues ont été rehaussées continuellement ou construites à proximité du lit de la Garonne. Cela limite alors fortement le champ d'expansion des crues, augmentant le risque de rupture en cas de forte crues et perturbant l'évacuation des volumes de débordement (effets constatés sur des crues historiques).*

### 3.3.2 Morphologie du secteur en aval de Toulouse

La Garonne endiguée dans sa traversée de Toulouse, s'écoule vers un fond de vallée relativement étroit (largeur d'environ 1 km) en aval de l'agglomération jusqu'à Fenouillet et Gagnac-sur-Garonne. Sur l'ensemble de la zone d'étude, le lit majeur du fleuve s'élargit progressivement pour atteindre une largeur importante (4 km) au voisinage de Grenade et Grisolles. Cette largeur importante du fond de vallée s'explique notamment par la présence des confluences rapprochées des cours d'eau de la Save (affluent rive gauche) et de l'Hers canalisé (affluent rive droite). Jusqu'à Verdun-sur-Garonne, le lit majeur se rétrécit à nouveau pour rester à une largeur constante (entre 2 et 3 km de large).

Le lit majeur inondable est globalement contenu entre les remontées du terrain naturel où ont été positionnés :

- en rive droite, le canal latéral à la Garonne
- en rive gauche, la RD2 (légèrement en hauteur par rapport au pied du coteau) et la RD26.

Sur l'ensemble du linéaire étudié, le lit majeur n'est que faiblement perturbé par la présence de digues éparses de faible hauteur (généralement inférieure à la crue décennale). Le processus naturel global d'inondation du fond de vallée est conservé.

Le lit mineur ainsi que le lit moyen (lit majeur proche du lit mineur) sont localisés sur la totalité du linéaire étudié en pied du coteau de la rive gauche. Bien que le lit moyen reste relativement droit et de largeur constante (1 à 2 km), le lit mineur suit un tracé sinueux en méandres plus ou moins marqués dont la progression historique s'est faite vers l'aval ou latéralement à l'axe du fond de vallée. Cette évolution est caractérisée par la présence de bras morts de la Garonne ou de dépressions du lit majeur, traces des anciens bras du cours d'eau.

Le lit majeur (inondable seulement lors des crues exceptionnelles du type crue centennale) est constitué par une longue terrasse entièrement localisée entre la rive droite du lit moyen et le pied du coteau de rive droite.

Le secteur de Garonne étudié en aval de Toulouse est donc caractérisé par :

- l'absence d'ouvrage (digue ou remblai divers) déviant les écoulements de crues de leur parcours naturel,
- en période de crue, la montée progressive des eaux vers le lit moyen puis le lit majeur participant alors davantage à la capacité débitante du fond de vallée qu'à sa capacité de stockage.

Cette configuration de la Garonne est observable de l'aval de Toulouse (Garonne pyrénéenne) jusqu'à l'amont de Castelsarrasin (secteur particulièrement endigué), soit un linéaire d'environ 60 km.



On retiendra le découpage suivant du fond de vallée :

- lit mineur : lieu des écoulements réguliers de la Garonne, toujours en eau.
- lit moyen : portion du fond de vallée située à proximité des bords de la Garonne et inondée dès la crue biennale.
- lit majeur bas : portion du fond de vallée inondée dès la crue décennale, située de part et d'autre du lit moyen.
- lit majeur haut : première terrasse du fond de vallée inondée dès la crue centennale, située principalement en rive droite du lit majeur bas.



## 4

# Modélisation hydraulique

## 4.1 Aspects calculatoires

### 4.1.1 Logiciel utilisé

Les modèles hydrauliques ont été réalisés sur support informatique, sur un linéaire de 15 km au droit de Marmande et 22 km en aval de Toulouse.

Ces modèles ont été réalisés à partir du code de calcul MIKE-11, développé par le Danish Hydraulic Institute et diffusé à l'échelle mondiale. Ce logiciel a été retenu parce qu'il permet de décrire finement la vallée inondable de la Garonne et qu'il est capable de restituer dans toute sa complexité l'hydraulique qui s'y rattache. Il peut notamment décrire les débordements du lit mineur vers les zones inondables avoisinantes ou les déversements par-dessus des digues de protection. Il est donc particulièrement adapté à notre démarche.

Un modèle hydraulique s'appuie sur une description de la topographie de la vallée, des zones inondables ainsi que sur une restitution des conditions d'écoulement associées. L'architecture du modèle repose sur un certain nombre de profils en travers, levés orthogonalement à l'axe du lit mineur de la rivière. La Figure 5 donne un exemple schématique de profil en travers.

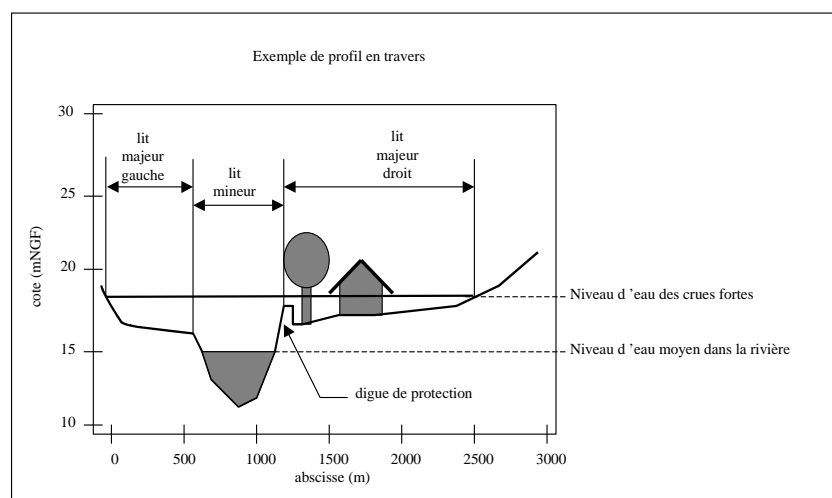


Figure 5 Profil en travers type

Le modèle permet de calculer en chaque section la cote et le débit atteint localement, tout en distinguant les différentes zones d'écoulement : lit mineur (lit de la rivière non débordante), lit moyen (zone inondable correspondante à des débordements assez fréquents), lit majeur (zone inondable atteinte par les débordements exceptionnels). Dans chacune de ces zones ou casiers hydrauliques, les calculs de l'écoulement se font indépendamment les uns des autres. Chacun des casiers est relié entre eux par une série de connexions, lieu des déversements liés au débordement de crue.

*Remarque : la modélisation des transferts éventuels nappe-cours d'eau et nappe-gravière n'est pas directement prise en compte dans cette modélisation.*

## 4.2 Paramétrage et structure des modèles

### 4.2.1 Coefficients de frottement et calage

Une étape importante de la modélisation consiste à « caler » les modèles hydrauliques de façon à ce que pour un débit donné (en l'occurrence un débit de crue) le fonctionnement global de la vallée et les niveaux d'eau calculés soient identiques aux observations réellement constatées lors de la crue. La perte de charge linéaire qui détermine les niveaux d'eau est paramétrable à partir du coefficient de frottement, autrement appelé coefficient de Strickler. Plus ce dernier est faible et plus les frottements sont importants. De même, plus les frottements sont importants et plus l'écoulement se fait difficilement, générant alors un stockage dynamique dans le fond de vallée et une remontée des hauteurs d'eau.

#### a) Secteur de Marmande

Les données disponibles sur le secteur de Marmande sont :

- des laisses de crue de 1981, 1952 et 1930
- une cartographie au 1/25 000ème des zones inondables distinguant les secteurs fréquemment inondés (crue biennale), les secteurs plus rarement inondés (crue décennale) et les secteurs inondés exceptionnellement (crue centennale)

Le calage a été effectué sur la crue de 1981 et la crue biennale (inondation du lit majeur dans les limites du premier endiguement latéral).

Les coefficients de Strickler retenus sont 30 dans le lit mineur et 10 dans le lit majeur.

## b) Secteur en aval de Toulouse

Les données disponibles sur le secteur en aval de Toulouse sont :

- une cartographie au 1/25 000ème des zones inondables distinguant les secteurs fréquemment inondés (crue biennale), les secteurs plus rarement inondés (crue décennale) et les secteurs inondés exceptionnellement (crue centennale)

Les modélisations réalisées précédemment de ce secteur ont révélé la difficulté de caler un modèle à partir de crues historiques anciennes et d'un modèle numérique de terrain actuel (donc différent).

Le calage a été réalisé sur la crue centennale, décennale et biennale.

Les coefficients de Strickler retenus sont 30 dans le lit mineur et 10 dans le lit majeur.

## c) Remarque concernant le calage

L'objectif des modèles réalisés pour la présente étude n'est pas de déterminer avec exactitude les hauteurs d'eau atteintes pour une crue donnée (les modélisations antérieures entreprises sur l'aval de Toulouse ont d'ailleurs démontré que cela n'était pas possible) mais les différences entre un état d'aménagement et un autre. Il s'agit en effet ici de construire des modèles capables de calculer des hauteurs d'eau réalistes puis de comparer les variations relatives lors de la modification du modèle numérique de terrain (scénarios de répartition de gravières sur le lit majeur).

Les calages réalisés sur les différents modèles satisfont donc aux conditions d'exploitation des résultats en valeurs relatives (relatives d'un scénario à l'autre).

## 4.2.2 Structure des modèles de terrain (singularités, casiers)

Les singularités du modèle ont été représentées :

- en les intégrant directement au modèle numérique de terrain (irrégularité, dépressions du terrain, rétrécissement du lit dû aux culées d'un pont ...)
- en modélisant des connexions spécifiques entre les casiers (ouvrages de franchissement sous une digue, clapets anti-retour de vidange des casiers ...)
- en créant des connexions d'un casier à un autre, afin de représenter les déversements d'un casier vers un autre à partir de leur cote de débordement (lue sur les plans topographiques disponibles).

Un élément important de la modélisation consiste à subdiviser le terrain naturel en casiers hydrauliques de façon à représenter au mieux les phénomènes de déversement ou les axes d'écoulement principaux.

### a) Secteur de Marmande

Le secteur de Marmande a été subdivisé en 8 secteurs indépendants :

- 1 bief pour le secteur filaire de la Garonne

Il s'agit du lit mineur et du lit moyen (noté GARONNE). Ce bief constitue l'axe central des écoulements du fond de vallée. Sa largeur totale de la rive droite à la rive gauche varie de 300 à 1 300 m.

- 2 casiers pour les secteurs endigués de la rive droite de la Garonne

Le premier casier (noté RD1) est situé dans la partie amont de la zone d'étude, depuis la limite amont du modèle jusqu'à Saint Pardoux-de-Breuilh.

Le second casier (noté RD2) est situé dans la partie aval de la zone d'étude, depuis l'aval du franchissement de la voie ferrée jusqu'à la limite aval du modèle.

- 5 casiers pour les secteurs endigués de la rive gauche de la Garonne

Le premier casier (noté RG1) est séparé de la Garonne par la digue de Fourques et limité à l'aval par la route départementale 933.

Le deuxième casier (noté SG1) est limité à l'amont par la route départementale 933 et à l'aval par l'endiguement des ruisseaux de la Tisouenque et du Goret.

Le troisième casier (noté RG2) est limité à l'amont par l'endiguement de la Tisouenque et du Goret et à l'aval par la voie ferrée.

Le quatrième casier (noté RG3) est limité à l'amont par la voie ferrée et à l'aval par l'endiguement du ruisseau du Serac et de l'Avance.

Le cinquième casier (noté RG4) est limité à l'amont par l'endiguement du Serac et s'étend jusqu'à la limite aval du modèle.

*Remarque : certaines digues secondaires présentes à l'intérieur des casiers décrits ci-dessus n'ont pas été singularisées (modélisées en tant que singularité hydraulique), l'altitude de leur crête de déversement ne le justifiant pas.*

### b) Secteur en aval de Toulouse

Le fond de vallée de la Garonne en aval de Toulouse ne présente pas de secteur dont les écoulements constitueraient une dérivation du cours d'eau principal. Il n'a donc pas été nécessaire de subdiviser le fond de vallée en casiers. Le lit mineur, le lit moyen et le lit majeur du fond de vallée de la Garonne ont été globalisés d'un seul tenant.

### 4.2.3 Conditions aux limites - Régime transitoire

La modélisation des écoulements de la Garonne tels qu'ils ont été entrepris pour la présente étude nécessite des conditions aux limites amont et aval pour chacun des secteurs modélisés.

- Condition limite amont :

Elle est fixée en termes de « débit rentrant » dans le modèle. Un débit constant (un débit pour chaque crue modélisée) n'aurait pas été suffisant pour appréhender les phénomènes de remplissage et de vidange des casiers hydrauliques. Le choix d'un débit variable (régime transitoire) a donc été retenu. Des hydrogrammes de crue (variation du débit en fonction du temps) ont été établis à partir des débits de pointe et des volumes de crue établis par le traitement statistique des enregistrements à Marmande et à Toulouse (voir 3.2 page 20).

- Condition limite aval :

Elle est fixée en termes de hauteur d'eau. Cette hauteur est fonction du débit transitant au travers de la section aval du modèle. Une courbe hauteur / débit a donc été imposée à l'aval de chacun des deux modèles. Ces courbes ont été établies à partir des débits et des hauteurs connus au droit de ces points.

## 4.3 Grandeurs caractéristiques utilisées pour la synthèse des valeurs numériques

Afin de simplifier l'analyse des résultats issus des simulations numériques (variation des hauteurs et des débits par pas de temps réguliers sur la durée totale de la crue) des résultats caractéristiques du comportement des écoulements dans le fond de vallée ont été extraits et présentés dans un tableau de synthèse (pages 41 et 49).

### 4.3.1 Niveaux de crue

Les niveaux maximums de crue ont été repérés en divers points du linéaire de Garonne modélisée.

#### a) Modèle de Marmande

Les points métriques du linéaire de Garonne pour lesquels ont été restitués les niveaux maximums calculés correspondent aux points en amont et en aval de chacun des casiers latéraux :

- pm 0 000 : amont du casier RD1
- pm 3 960 : aval de RD1 et amont de RG1

- pm 8 220 : aval de RG1 et amont de RG2
- pm 10 110 : aval de RG2 et amont de RG3 et de RD2
- pm 14 249 : milieu des casiers RG4 et RD2

Le niveau atteint dans un casier latéral est relativement identique entre sa limite amont et sa limite aval. En effet, son fonctionnement est davantage celui d'une structure de stockage (grand plan d'eau de surface horizontale) plutôt que celui d'un axe d'écoulement parallèle à la vallée (surface légèrement inclinée). L'inondation par remous ne génère pas des débits importants ni des vitesses élevées. La perte de charge par frottement est donc peu élevée et les casiers ressemblent à des plans d'eau au repos lorsqu'ils sont sollicités par les volumes de crue débordante. En conséquence, une seule valeur du niveau maximum d'eau atteint a été restituée dans le tableau. Dans le cas des crues annuelle et biennale, les casiers ne sont pas inondés, aucune valeur de niveau d'eau n'a donc été restituée dans le tableau de synthèse.

#### **b) Modèle en aval de Toulouse**

Les points métriques du linéaire de Garonne pour lesquels ont été restitués les niveaux maximums calculés correspondent à des points répartis de façon homogène sur l'ensemble du cours d'eau modélisé dans le cadre de cette étude :

- pm 0 000 : amont du modèle,
- pm 4 900,
- pm 10 000,
- pm 13 100,
- pm 20 500 : aval du modèle.

### **4.3.2 Volume d'écêtement stocké en fin de crue**

Connaissant le fonctionnement global du fond de vallée inondé par remous, il paraît intéressant de quantifier le caractère stockant du linéaire modélisé. Physiquement, le fond de vallée s'apparente à une structure de stockage qui se vide en même temps qu'elle se remplit. Le tableau de synthèse restitue la valeur de volume resté dans le fond de vallée, une fois que la crue est passée.

Ce volume correspond à la valeur du volume stocké dans les dépressions du sol. Leur vidange est beaucoup plus longue que la durée de la crue (vidange par transfert vers la nappe, par percolation au travers des digues ou évacuation par un clapet de faible capacité). C'est également une approche du volume permettant l'écêtement de la crue caractérisant l'amortissement de l'onde de crue.

Une comparaison par rapport au volume de pointe de la crue a permis une évaluation sous forme de pourcentage.



### 4.3.3 Paramètres de forme des hydrogrammes

Il s'agit des paramètres de forme de la courbe d'évolution du débit en fonction du temps :

- *valeur maximum du débit* : en effet c'est pour cette valeur du débit que les désordres hydrauliques seront les plus marqués. Il est également représentatif de l'étalement ou au contraire de l'accélération de la crue.
- *durée de la crue* : elle est proportionnelle aux durées de submersion des secteurs sollicités par les débordements. Elle caractérise également le ralentissement ou l'accélération de la crue.

*Remarque* : Il convient de rappeler à ce stade de l'étude que ce ne sont pas les valeurs numériques intrinsèques des grandeurs calculées (propres à ce site en particulier) qui sont à retenir, mais leur variation relative d'un scénario d'aménagement à l'autre.



## Scénarios et hypothèses de calcul

### 5.1 Etats d'exploitation du fond de vallée

#### 5.1.1 Cinq scénarios modélisés

Les scénarios suivants ont été étudiés pour chacun des modèles :

- Scénario n°0 : absence totale de gravière

Il s'agit de la situation de référence. Aucune des gravières existantes ou futures n'a été représentée. La traduction en termes de modélisation revient à fixer une cote du fond des gravières égale à la cote du terrain naturel.

- Scénario n°1 : moyenne densité de gravière

Les gravières actuellement exploitées ou les anciens sites d'extraction ont été représentés par une dépression dans le sol, reliées à la Garonne par des lois de déversement (modélisant le remplissage et la vidange des sites d'extractions)

- Scénario n°2 : forte densité de gravière

Des gravières n'existant pas à ce jour ont été ajoutées de façon à étudier le cas d'une exploitation intensive du lit majeur par des sites d'extraction. La description de la répartition surfacique des sites d'exploitation (actuels ou fictifs) est présentée au paragraphe 5.1.2 page 36.

- Scénario n°3 : moyenne densité de gravière avec connexion par un déversoir d'équilibre

La répartition des gravières présentée pour le scénario n°1 a été reprise. Cependant, un déversoir d'équilibre destiné à remplir les gravières situées dans le lit moyen avant le débordement généralisé de la Garonne été mis en place. Ce déversoir d'équilibre est proposé afin d'atténuer l'éventuelle érosion de berge

pouvant apparaître en début de remplissage des gravières proches du lit mineur (voir Figure 4 page 16).

- Scénario n°4 : forte densité de gravière avec connexion par un déversoir d'équilibre

Comme pour le scénario précédent, la répartition des gravières présentée au scénario 2 a été reprise. Un déversoir d'équilibre a été mis en place de façon à réduire l'éventuelle érosion de berge des gravières proches du lit mineur.

*Remarque : l'ajout d'un déversoir d'équilibre n'a été envisagé que pour les gravières localisées dans le lit moyen et inondées dès la crue biennale. En effet, si ce type d'aménagement est simple à réaliser pour des sites d'extraction proches du lit mineur (distance de l'ordre de la trentaine de mètre), il est plus difficile à mettre en œuvre pour des gravières éloignées du cours d'eau, voire même localisées derrière l'endiguement des casiers comme c'est le cas sur le secteur de Marmande (nécessité de prolonger l'endiguement du casier tout autour du site d'extraction et du déversoir d'équilibre d'une longueur de plusieurs centaines de mètres).*

*De plus, les gravières localisées à l'intérieur d'un casier hydraulique ne sont pas nécessairement endiguées puisqu'elles bénéficient déjà d'une protection contre les crues.*

*Enfin, les gravières situées à distance du lit mineur sont moins exposées à l'érosion des débordements (largeur des terres séparant le site d'extraction du cours d'eau).*

### 5.1.2 Répartition surfacique des secteurs d'exploitation

Les zones actuellement exploitées pour l'extraction de granulat ont été localisées à l'aide des informations disponibles sur les cartes IGN 1/25 000<sup>ème</sup> ainsi que sur la cartographie des zones inondables (Monographie de la Garonne).

La modélisation de nouveaux sites d'exploitation a été faite à partir d'une répartition réaliste des surfaces explicitée dans les tableaux ci-dessous.

En référence au paragraphe 3.3 page 22, et pour des besoins de clarification, ont été distingués :

- le lit moyen, inondé dès la crue biennale,
- le lit majeur (cas de Marmande) ou lit majeur bas (cas de l'aval de Toulouse) inondé dès la crue décennale,
- le lit majeur haut (cas de l'aval de Toulouse) inondé dès la crue centennale.

### 5.1.2.1 Secteur de Marmande

Le récapitulatif des surfaces exploitées modélisées est le suivant :

SURFACE (m <sup>2</sup> )	lit moyen	lit majeur	TOTAL
totale	11 475 000	30 875 000	42 350 000
exploitée actuellement	510 000	340 000	850 000
%	4,4	1,1	2,0
exploitée supplémentaire	262 500	1 005 000	1 267 500
%	2,3	3,3	3,0
exploitée totale	772 500	1 345 000	2 117 500
%	6,7	4,4	5,0

Tableau 3 Répartition des surfaces exploitées sur le secteur de Marmande

Le lit moyen, déjà exploité à 4,4 %, ne présente que de faible potentialité pour de nouvelles exploitations. Les surfaces d'exploitation fictives destinées à la mise en œuvre des scénarios n°2 et 4 ont été davantage réparties sur le lit majeur, de façon à multiplier le pourcentage total de surface exploitée par 2,5 (soit un total de 5 % de la surface du fond de vallée).

### 5.1.2.2 Secteur en aval de Toulouse

Le récapitulatif des surfaces exploitées modélisées est le suivant :

SURFACE (m <sup>2</sup> )	lit moyen	lit majeur bas	lit majeur haut	TOTAL
totale	5 425 000	20 405 000	35 595 000	61 425 000
exploitée actuellement	283 750	491 000	1 072 500	1 847 250
%	5,2	2,4	3,0	3,0
exploitée supplémentaire	283 750	491 000	1 072 500	1 847 250
%	5,2	2,4	3,0	3,0
exploitée totale	567 500	982 000	2 145 000	3 694 500
%	10,5	4,8	6,0	6,0

Tableau 4 Répartition des surfaces exploitées sur le secteur en aval de Toulouse

Les zones différenciées ci-dessus ont des potentialités équivalentes pour la mise en place de nouveaux sites d'extraction. Dans sa globalité, le secteur en aval de Toulouse a une exploitation légèrement plus importante que le secteur de Marmande. Par conséquent, le pourcentage de surface exploitée a été multiplié par 2 (6 % de la surface du fond de vallée).

## 5.2 Conditions initiales

Pour chacune des simulations réalisées dans le cadre de cette étude, le niveau initial des gravières retenu a été fixé à la hauteur d'eau dans le lit mineur de la Garonne correspondant à l'écoulement du débit de début de crue (250 m<sup>3</sup>/s dans le cas du secteur en aval de Toulouse et 1000 m<sup>3</sup>/s dans le cas du secteur de Marmande).

L'hypothèse de cette condition initiale implique que la nappe est à l'équilibre avec le niveau de la Garonne :

- pente de la nappe nulle en suivant un axe perpendiculaire au fond de vallée
- pente de la nappe égale à la pente de la surface de la Garonne en suivant l'axe du fond de vallée

Cette hypothèse correspond à la situation suivante :

- le débit de début de crue correspond à une situation permanente préalable au phénomène de crue,
- le débit d'échange global entre la Garonne et la nappe est nul.

On suppose de plus que le niveau d'eau dans les gravières n'est influencé, durant la crue, que par les débordements de la Garonne au-dessus du terrain naturel, vers son lit moyen et son lit majeur.

Les conséquences de ces hypothèses agissent principalement le volume d'écêtement calculé en fin de crue (proportionnel au vide situé entre la surface libre et le haut des berges de la gravière) :

- soit le niveau initial dans les gravières est inférieur. L'évaluation du volume d'écêtement sera alors sous-estimée par rapport à la réalité.
- soit le niveau initial dans les gravières est supérieur. L'évaluation du volume d'écêtement sera alors surestimée par rapport à la réalité.

## 6

## Analyse et interprétation des résultats

### 6.1 Secteur de Marmande

#### 6.1.1 Analyse qualitative et interprétation

Le fonctionnement global de la plaine inondable sur le secteur de Marmande est le suivant :

- pour une crue annuelle, aucun débordement significatif vers le lit moyen n'est à noter.
  - les gravières ne sont pas connectées aux eaux de la Garonne, dans le cas des scénarios 1 et 2, le niveau d'eau étant inférieur à la cote du terrain naturel qui les sépare du cours d'eau,
  - les gravières sont connectées à la Garonne dans le cas des scénarios 3 et 4, le niveau d'eau dépassant la cote du radier des déversoirs d'équilibre.
- pour une crue biennale, seul le lit moyen (non endigué) est submergé. Aucun des grands casiers des rives droite et gauche n'est inondé. Pour les scénarios 1 à 4, les gravières actuelles et fictives du lit moyen sont remplies par le débordement de la Garonne :
  - débordement généralisé (au-dessus du terrain naturel) pour les scénarios 1 et 2,
  - débordements par les déversoirs d'équilibre puis par le débordement généralisé dans le cas des scénarios 3 et 4.

- pour une crue décennale, les grands casiers latéraux sont inondés principalement par remous depuis l'aval. Les gravières, jusque là protégées des crues fréquentes (annuale à biennale) derrière les digues de protection, sont alors submergées. Les casiers latéraux et les gravières qui s'y trouvent agissent en terme de stockage des volumes, contribuant alors davantage au ralentissement de la crue qu'à sa propagation vers l'aval. Ce ralentissement caractérise l'amortissement de la crue.
- pour une crue centennale, les grands casiers latéraux sont inondés d'abord par remous depuis l'aval, puis par débordement généralisé par-dessus les digues de protection latérale à la Garonne. On note cependant que la digue de Fourques n'est submergée que dans sa partie aval. Les casiers latéraux et les gravières qui s'y trouvent contribuent d'abord au stockage des volumes de crues (en phase de remplissage par remous), puis à la capacité débitante (en phase d'inondation par l'amont).

## 6.1.2 Tableau de synthèse des résultats numériques

Le tableau suivant présente les principaux résultats numériques de la crue annuelle et de la crue biennale pour les scénarios n°0 à 4, et de la crue décennale et centennale pour les scénarios n°0 à 2. En effet, la présence des déversoirs d'équilibres des gravières du lit moyen n'est plus ressentie de façon significative sur l'écoulement de ces crues. Seuls les scénarios 0, 1 et 2 sont présentés pour les deux crues les plus rares.

Les courbes des hydrogrammes pour les différentes crues et les différents scénarios sont également présentées en Annexe 4.

## 6.1.3 Analyse quantitative des résultats de simulation

### 6.1.3.1 Crue annuelle

#### a) Analyse

On constate pour ce type de crue ne sortant pas du lit moyen que :

- dans le cas des scénarios 1 et 2, il y a :
  - invariance des niveaux d'eau maximums,
  - invariance des volumes d'écrêtement stockés,
  - invariance du débit de pointe de la crue,
  - invariance de la durée de crue.



niveau maximum (m NGF)	crue état				annuale				biennale				décennale				centennale								
	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
Garonne (pm 0 000)	23.32	23.32	23.32	23.32	23.31	23.84	23.84	23.84	23.84	23.84	23.84	23.84	23.84	23.84	23.84	24.96	24.96	24.96	24.96	24.96	25.83	25.83	25.83	25.83	25.83
Garonne (pm 3 960)	22.09	22.09	22.09	22.09	22.08	22.52	22.52	22.52	22.52	22.52	22.52	22.52	22.52	22.52	22.52	23.58	23.58	23.58	23.58	23.58	24.62	24.62	24.62	24.62	24.62
Garonne (pm 8 220)	20.84	20.84	20.84	20.83	20.83	21.30	21.30	21.30	21.30	21.30	21.30	21.30	21.30	21.30	21.30	22.38	22.38	22.38	22.38	22.38	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46
Garonne (pm 10 110)	20.51	20.51	20.51	20.50	20.49	20.94	20.94	20.94	20.94	20.94	20.94	20.94	20.94	20.94	20.94	21.89	21.89	21.89	21.89	21.89	22.91	22.91	22.91	22.91	22.91
Garonne (pm 14 249)	19.87	19.87	19.87	19.86	19.86	20.25	20.25	20.25	20.25	20.25	20.25	20.25	20.25	20.25	20.25	21.43	21.43	21.43	21.43	21.43	22.18	22.18	22.18	22.18	22.18
RD1																23.58	23.58	23.58	23.58	23.58	24.93	24.93	24.93	24.93	24.93
RG1																21.75	21.74	21.74	21.74	21.74	22.84	22.84	22.84	22.84	22.83
SG1																21.82	21.81	21.81	21.81	21.81	22.84	22.84	22.84	22.84	22.83
RG2																21.86	21.86	21.86	21.86	21.86	22.81	22.81	22.81	22.81	22.79
RG3																21.61	21.61	21.61	21.61	21.61	22.66	22.66	22.66	22.66	22.65
RG4																20.93	20.93	20.93	20.93	20.93	22.01	22.01	22.01	22.01	22.00
RD2																20.93	20.93	20.93	20.93	20.93	22.01	22.01	22.01	22.01	22.00
volume stocké (103 m3)	514 100	514 100	514 100	514 100	514 100	886 000	886 000	886 000	886 000	886 000	886 000	886 000	886 000	886 000	886 000	1 935 000	1 935 000	1 935 000	1 935 000	1 935 000	3 437 400	3 437 400	3 437 400	3 437 400	3 437 400
	514 100	514 100	514 100	513 700	513 300	886 000	885 000	884 600	885 400	885 400	885 400	885 400	885 400	885 400	885 400	1 929 700	1 927 500	1 927 500	1 927 500	1 927 500	3 431 900	3 429 700	3 429 700	3 429 700	3 427 300
	0	0	0	400	800	0	1 000	1 400	600	900	600	600	600	600	600	5 300	7 500	9 900	9 900	9 900	5 500	7 700	10 100	10 100	10 100
% du volume total	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.4	0.5	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	
débit de pointe (m3/s)	2 700	2 700	2 700	2 700	2 700	3 300	3 300	3 300	3 300	3 300	3 300	3 300	3 300	3 300	3 300	5 320	5 320	5 320	5 320	5 320	7 610	7 610	7 610	7 610	7 610
	2 690	2 690	2 690	2 680	2 670	3 290	3 290	3 290	3 290	3 290	3 290	3 290	3 290	3 290	3 290	5 310	5 310	5 310	5 310	5 310	7 610	7 610	7 610	7 610	7 600
	2 690	2 690	2 690	2 680	2 670	3 290	3 290	3 290	3 290	3 290	3 290	3 290	3 290	3 290	3 290	5 220	5 220	5 220	5 220	5 220	7 580	7 580	7 580	7 580	7 580
durée de la crue (heure)	143	143	143	143	143	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	251	251	251	251	251	319	319	319	319	319
	143	143	143	143	143	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	251	251	251	251	251	319	319	319	319	319
	143	143	143	143	143	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	251	251	251	251	251	319	319	319	319	319

Tableau 5 Tableau récapitulatif des résultats numériques des modélisations du secteur de Marmande

- dans le cas des scénarios 3 et 4, il y a :
  - un abaissement des niveaux par rapport au scénario de référence (environ 0,01 à 0,02 m, soit 0,25 à 1,15 % de la montée du niveau de crue),
  - l'apparition d'un volume de stockage en fin de crue qui n'existait pas pour le scénario de référence (0,4 à 0,8 Mm<sup>3</sup> soit 0,1 à 0,2 % du volume de crue),
  - une diminution du débit de pointe (de 20 à 30 m<sup>3</sup>/s soit 0,7 à 1,1 % du débit de pointe),
  - aucune variation significative de la durée de la crue.

### **b) Interprétation**

Dans le cas des scénarios 1 et 2, aucun échange n'a pu se réaliser entre les gravières et la Garonne, le niveau de cette dernière restant en dessous de la cote du terrain naturel. En conséquence, la crue n'est pas modifiée par la présence des gravières.

Dans le cas des scénarios 3 et 4, des échanges se produisent entre les gravières et la Garonne, par le biais des déversoirs d'équilibre. En effet, le niveau d'eau atteint dans la Garonne dépasse la cote radier des déversoirs, dérivant ainsi une partie du débit vers les gravières durant la pointe de crue. Il en résulte un abaissement plus ou moins important du débit de pointe et des hauteurs maximums (en fonction de la surface exploitée).

Une partie du volume ainsi détourné ne retourne pas directement vers la Garonne : lors de l'abaissement du niveau de la Garonne en dessous de la cote radier des déversoirs d'équilibre, le volume restant dans les gravières est stocké. Ce volume d'eau retournera vers le cours d'eau par un transfert au travers de la nappe d'accompagnement. Il constitue une partie du volume d'écrêtement, contribuant à l'amortissement des crues (aplatissement de l'hydrogramme de crue).

### **c) Conclusion**

On retient donc que les faibles crues légèrement débordantes (qui sont également les plus fréquentes) :

- ne sont pas modifiées par la présence de gravières si elles n'atteignent pas les sites d'extraction,
- sont amorties en hauteur maximum et en débit maximum dans le cas où des déversoirs d'équilibre, s'il en existe, autorisent un déversement dès le début de la montée de la crue.

### 6.1.3.2 Crue biennale

#### a) Analyse

On constate pour ce type de crue dont l'inondation est restreinte au lit moyen que :

- dans le cas des scénarios 1 et 2, il y a :
  - invariance des niveaux d'eau maximums,
  - stockage d'une partie non négligeable du volume de crue (1,0 à 1,4 Mm<sup>3</sup>, soit 0,1 à 0,2 % du volume total de crue)
  - invariance du débit de pointe de la crue,
  - invariance de la durée de crue.
- dans le cas des scénarios 3 et 4, il y a :
  - invariance des niveaux d'eau maximums,
  - stockage d'une partie du volume de crue (0,6 à 0,9 Mm<sup>3</sup>, soit moins de 0,1 % du volume total de crue), ces volumes étant inférieurs aux volumes stockés dans le cas d'une crue biennale avec déversoir d'équilibre mais supérieurs aux volumes stockés dans le cas d'une crue annuelle avec déversoir d'équilibre,
  - invariance du débit de pointe de la crue,
  - invariance de la durée de crue.

#### b) Interprétation

Dans le cas des scénarios 1 et 2, le niveau de la Garonne est monté suffisamment haut pour qu'un débordement généralisé par-dessus la cote du terrain naturel se produise. En conséquence, les gravières qui n'étaient pas concernées par la crue annuelle sont maintenant sollicitées. Une importante partie du volume de crue est directement déversée vers les sites d'extraction durant la montée des eaux. Ces déversements se produisent avant la pointe de crue, ce qui explique qu'aucune variation n'est constatée sur le débit de pointe et les hauteurs maximums.

Lors de la décrue, les volumes déversés restent piégés dans les gravières sans pouvoir retourner directement vers la Garonne. Les gravières du lit moyen sont alors totalement remplies et leur vidange au travers de la nappe est différée dans le temps. L'amortissement de la crue, bien qu'il n'apparaisse pas de façon significative sur la durée et la pointe de la crue, est vérifié par la variation du volume d'écrêtement.

Dans le cas des scénarios 3 et 4, l'amortissement des crues, encore non significatif sur la durée et la pointe (hauteur et débit) de crue, est lié à l'écrêtement d'une partie du volume. Ce volume est moins important que dans le cas des scénarios 1

et 2 de la crue biennale car la présence des déversoirs d'équilibre abaisse la cote de vidange des sites d'extraction. En conséquence, une partie non négligeable des volumes déversés en début de crue vers les gravières retourne directement à la Garonne pendant la décrue, jusqu'à ce que le niveau atteigne la cote radier des déversoirs d'équilibre.

Lors de la crue biennale, les gravières ont été pleinement sollicitées par la crue, tandis que lors de la crue annuelle, les gravières n'ont été sollicitées que partiellement. Ceci explique la différence entre les volumes d'écrêtement plus important dans le cas de crue biennale que dans le cas de la crue annuelle.

### c) Conclusion

On retient donc que dans le cas des crues biennales, pour lesquelles un débordement généralisé vers les sites d'extraction se produit :

- un amortissement est constaté à partir de l'analyse des volumes d'écrêtement, ces derniers étant fonction de la cote de vidange,
- les crues ne sont pas modifiées de façon significative dans leurs valeurs de pointes (hauteur et débit) si les débordements vers les gravières se font en début de crue,

### 6.1.3.3 Crue décennale

#### a) Analyse

Seuls les scénarios 1 et 2 de la crue décennale ont été comparés au scénario de référence. En effet, pour des crues décennales ou supérieures, les déversoirs d'équilibre sont noyés sous les écoulements du lit mineur. Leurs effets ne sont alors plus significatifs.

Pour ces deux scénarios, les simulations de la crue décennale remontant jusque dans les grands casiers hydrauliques des rives droite et gauche, permettent de constater :

- un abaissement localisé des niveaux d'eau maximums (0,01 à 0,02 m soit 0,2 à 0,7 % de la hauteur d'amplitude de la crue) dans le lit majeur non endigué ainsi que dans les casiers hydrauliques,
- une augmentation du volume stocké en fin de crue (de 2,2 à 4,6 Mm<sup>3</sup> supplémentaire soit 0,1 à 0,2 % du volume de crue),
- une invariance du débit de pointe,
- une invariance de la durée de crue.

## b) Interprétation

La capacité d'écêtement des crues du scénario de référence (volume stocké non nul pour le scénario 0) s'explique par la configuration des grands casiers hydrauliques latéraux, dont une partie n'est pas totalement vidangée en fin de crue (présence de dépression dans le sol, capacité des ouvrages de vidange sous les digues limités ...) Ces casiers participent donc à l'amortissement des crues sans qu'aucune gravière n'y ait été modélisée.

L'augmentation de la capacité de stockage entre le scénario 0 et le scénario 1 puis entre le scénario 0 et le scénario 2 est plus élevée pour la crue décennale que pour la crue biennale. Cette variation s'explique par la contribution des gravières de lit majeur au stockage :

- dans le cas du scénario 1, l'augmentation du stockage est de 2,2 Mm<sup>3</sup>, soit 1,0 Mm<sup>3</sup> dans le lit moyen (évalué lors de la crue biennale au scénario 1) plus 1,2 Mm<sup>3</sup> dans le lit majeur,
- dans le cas du scénario 2, l'augmentation du stockage est de 4,6 Mm<sup>3</sup>, soit 1,4 Mm<sup>3</sup> dans le lit moyen (évalué lors de la crue biennale au scénario 2) plus 3,2 Mm<sup>3</sup> dans le lit majeur.

Qu'ils soient localisés dans le lit moyen ou dans le lit majeur endigué, les sites d'extraction accentuent l'amortissement de la crue par l'accroissement de la capacité de stockage globale du fond de vallée. En effet, leur vidange ne peut s'effectuer qu'en différé par transfert au travers de la nappe.

Cette condition est vérifiée dans la mesure où la montée de crue de la Garonne, relativement brève en quelques jours, est plus rapide que la remontée de la nappe (ce qui est le cas usuellement).

L'abaissement des niveaux d'eau maximums s'explique par l'augmentation de la capacité de stockage des casiers latéraux liée au creusement des gravières dont le niveau initial avant remplissage a été fixé à une valeur inférieure à la cote du terrain naturel.

On note, dans le cas du scénario 1, que ce sont les casiers amont de la rive gauche (RG1 et SG1) qui profitent de l'abaissement de la ligne d'eau. En effet, ils sont remplis depuis le casier aval (RG2). La capacité de stockage de ce dernier ayant été augmentée par le creusement de gravières, il intercepte une plus grande partie du volume du remous. Les déversements vers les casiers amont sont alors réduits.

Bien que l'amortissement de la crue soit vérifié par l'analyse des volumes stockés en fin de crue, il n'apparaît pas de façon significative sur les débits de pointe ainsi que sur les durées de crue.

### c) Conclusion

On retient donc que dans le cas des crues décennales, pour lesquelles le débordement inonde le lit moyen puis les grands casiers du lit majeur par remous :

- un amortissement est vérifié à partir de l'analyse du volume d'écrêtement, ce dernier étant d'autant plus important que les gravières du lit majeur endigué sont inondées,
- cet amortissement est constaté sur les hauteurs maximums légèrement réduites durant le pic de crue,
- l'amortissement de la crue par les gravières n'est pas significatif sur le débit de pointe ni sur la durée de la crue.

### 6.1.3.4 Crue centennale

#### a) Analyse

Comme dans le cas de la crue décennale, les déversoirs d'équilibre interviennent en tout début de crue dans le cas d'un événement centennal. Leurs effets ne sont donc visualisables. En conséquence, seuls les scénarios 1 et 2 ont été étudiés.

Pour ces scénarios ainsi que pour le scénario de référence l'inondation des casiers latéraux se fait d'abord par remous depuis l'aval puis par déversement par-dessus la quasi-totalité des digues de protection. On constate alors :

- un abaissement localisé des niveaux d'eau maximums (0,01 à 0,02 m soit 0,2 à 0,5 % de la hauteur d'amplitude de la crue) dans le lit majeur non endigué ainsi que dans les casiers hydrauliques,
- une augmentation du volume stocké en fin de crue (de 2,2 à 4,6 Mm<sup>3</sup> supplémentaire soit jusqu'à 0,1 % du volume de crue),
- un abaissement localisé du débit de pointe (de 10 m<sup>3</sup>/s, soit 0,1 % du débit total)
- une invariance de la durée de crue.

#### b) Interprétation

Comme dans le cas de la crue décennale le lit majeur endigué est inondé. Cependant, pour la crue centennale, l'inondation des casiers se fait par surverse depuis l'amont. Les casiers participent donc davantage à l'écoulement dynamique de la crue, plutôt qu'à son stockage. Les gravières des casiers latéraux augmentent alors la section de passage (creusement du fond du casier) et réduisent les frottements apparents du fond des casiers. En conséquence, le débit transitant dans les casiers est très légèrement favorisé au dépend du débit transitant dans le lit moyen et le lit mineur (10 m<sup>3</sup>/s en moins pour un débit total de 7 600 m<sup>3</sup>/s).

L'augmentation de la capacité d'écoulement du lit majeur décrite ci-dessus ainsi que l'augmentation de la capacité de stockage, contribuent également à l'abaissement des hauteurs d'eau maximums à l'intérieur même des casiers mais aussi dans le lit moyen non endigué.

On constate également que l'augmentation du volume stocké entre le scénario 0 et le scénario 1 (2,2 Mm<sup>3</sup>) ou entre le scénario 0 et le scénario 2 (4,6 Mm<sup>3</sup>) est identique dans le cas de la crue décennale et dans la crue centennale. En effet, dans les deux cas, la capacité de stockage des gravières est exploitée au maximum.

### c) Conclusion

On retient donc que dans le cas des crues centennales, pour lesquelles le débordement inonde le lit moyen puis les grands casiers du lit majeur par remous depuis l'aval puis par déversement depuis l'amont :

- un amortissement est vérifié à partir de l'analyse du volume d'écêtement, les variations de ce dernier sont identiques aux variations constatées dans le cas de la crue décennale,
- cet amortissement est constaté sur les hauteurs maximums durant la pointe de crue,
- le débit de pointe du lit majeur est légèrement augmenté au dépend du débit du lit mineur et du lit moyen non endigué pour lesquels le débit est réduit,
- aucun effet significatif n'est constaté sur la durée de la crue.

## 6.1.4 Synthèse des effets constatés sur le secteur de Marmande

La modélisation des différents scénarios d'aménagement sur le secteur de Marmande a permis de constater que les gravières ont pour effet un amortissement général des crues.

Cet amortissement est principalement constaté sous la forme de l'augmentation des volumes de crue stockés en lit moyen ou en lit majeur. Bien que ces volumes stockés soient importants, ils sont relativement faibles par rapport au volume total de la crue considérée (inférieurs à 0,2 %). Les gravières agissent donc de façon similaire à des ouvrages d'écêtement de crue.

Si cet amortissement intervient à l'instant du pic de crue, alors, un abaissement généralisé des hauteurs d'eau et du débit de pointe de crue est constaté. Cet amortissement de faible amplitude n'est cependant pas toujours significatif. En conséquence, il peut être totalement imperceptible. Cet amortissement peut également se traduire par le retardement du pic de crue (instant du maximum du débit), qui n'est pas systématique : le retard est constaté uniquement sur la crue décennale pour laquelle il y a concomitance du remplissage des gravières avec le pic de crue (voir hydrogrammes en Annexe 4).

En revanche, pour aucune simulation, la durée de la crue n'a été modifiée de façon significative par la présence des gravières.

## **6.2 Secteur en aval de Toulouse**

### **6.2.1 Description qualitative de l'évolution des inondations**

Le fonctionnement global de la plaine inondable est celui d'une large vallée exempte d'ouvrage transversal ou longitudinal, modifiant les écoulements naturels.

Par conséquent, le remplissage du fond de vallée se déroule avec une variation de la largeur de la zone inondable et de la hauteur de submersion homogène sur la totalité de la largeur du profil en travers considéré.

La largeur de la zone inondable peut varier de quelques centaines de mètres de part et d'autre de la Garonne dans le cas d'une crue annuelle, jusqu'à plusieurs kilomètres dans le cas de la crue centennale.

### **6.2.2 Tableau de synthèse des résultats numériques**

Le tableau suivant présente les principaux résultats numériques de la crue annuelle et la crue biennale pour les scénarios n°0 à 4, et de la crue décennale et centennale pour les scénarios n°0 à 2. En effet, les gravières situées en lit moyen (zone inondée dès la crue annuelle) sont noyées sous les écoulements de la crue décennale et centennale. Les effets des déversoirs d'équilibre ne sont donc pas significatifs et seuls les scénarios n°0, 1 et 2 sont présentés pour les crues les plus rares.

Les courbes des hydrogrammes pour les différentes crues et les différents scénarios sont également présentées en Annexe 4.



	crue état					annuale					biennale				décennale			centennale				
	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	0	1	2	
niveau maximum (m NGF)	Garonne (pm 0 000)	116.22	116.22	116.22	116.22	116.22	117.20	117.16	117.16	117.16	117.16	118.97	118.90	118.89	120.30	120.10	120.09					
	Garonne (pm 4 900)	111.57	111.57	111.57	111.57	111.57	112.73	112.73	112.73	112.73	112.73	114.58	114.55	114.52	115.80	115.75	115.69					
	Garonne (pm 10 000)	108.06	108.06	108.06	108.06	108.06	108.93	108.92	108.92	108.92	108.92	110.24	110.19	110.16	111.33	111.29	111.23					
	Garonne (pm 13 100)	105.08	105.08	105.08	105.07	105.06	106.28	106.28	106.28	106.28	106.28	107.75	107.72	107.71	108.71	108.69	108.64					
	Garonne (pm 15 200)	103.65	103.65	103.65	103.65	103.64	104.37	104.37	104.37	104.37	104.37	105.86	105.83	105.81	106.63	106.60	106.57					
	Garonne (pm 20 050)	99.62	99.62	99.62	99.62	99.61	100.77	100.77	100.77	100.78	100.78	102.09	102.04	102.04	103.01	102.92	102.88					
volume stocké (103 m3)	Total entrant	124 600	124 600	124 600	124 600	124 600	221 600	221 600	221 600	221 600	221 600	471 800	471 800	471 800	796 200	796 200	796 200					
	Total sortant	124 600	124 600	124 600	124 000	123 400	221 600	220 600	221 000	220 400	221 000	471 800	468 700	465 800	796 200	787 000	777 200					
	en fin de crue	0	0	0	600	1 200	0	1 000	1 800	600	1 200	0	3 100	6 000	0	9 200	19 000					
	% du volume total	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.0	0.5	0.8	0.3	0.5	0.0	0.7	1.3	0.0	1.2	2.4					
débit de pointe (m3/s)	Garonne amont	1 140	1 140	1 140	1 140	1 140	1 690	1 690	1 690	1 690	1 690	3 020	3 020	3 020	4 700	4 700	4 700					
	Garonne intermédiaire	1 130	1 130	1 130	1 130	1 130	1 680	1 680	1 680	1 680	1 680	2 990	2 960	2 960	4 660	4 640	4 580					
	Garonne aval	1 120	1 120	1 120	1 110	1 110	1 660	1 660	1 660	1 660	1 660	2 950	2 920	2 920	4 620	4 570	4 480					
durée de la crue (heure)	Garonne amont	70	70	70	70	70	86	86	86	86	86	111	111	111	131	131	131					
	Garonne intermédiaire	71	71	71	71	71	87	87	87	87	87	111	111	111	132	132	132					
	Garonne aval	71	71	71	71	71	87	87	87	87	87	111	111	111	132	132	132					

Tableau 6 Tableau récapitulatif des résultats numériques des modélisations du secteur en aval de Toulouse

## 6.2.3 Analyse quantitative des résultats de simulation

### 6.2.3.1 Crue annuelle

#### a) Analyse

On constate pour ce type de crue ne sortant pas du lit moyen que :

- dans le cas des scénarios 1 et 2, il y a :
  - invariance des niveaux d'eau maximums,
  - invariance des volumes d'écrêtement stockés,
  - invariance du débit de pointe de la crue,
  - invariance de la durée de crue.
- dans le cas des scénarios 3 et 4, il y a :
  - un abaissement des niveaux par rapport au scénario de référence (environ 0,01 à 0,02 m, soit 0,3 à 0,6 % de la montée du niveau de crue),
  - l'apparition d'un volume stocké en fin de crue qui n'existait pas pour le scénario de référence (0,6 à 1,2 Mm<sup>3</sup> soit 0,5 à 1,0 % du volume de crue),
  - une diminution du débit de pointe en aval (de 10 m<sup>3</sup>/s environ, soit 0,9 % du débit de pointe),
  - aucune variation significative de la durée de la crue.

#### b) Interprétation

Dans le cas des scénarios 1 et 2, aucun échange n'a pu se réaliser entre les gravières et la Garonne, le niveau de cette dernière restant en dessous de la cote du terrain naturel. En conséquence, la crue n'est pas modifiée par la présence des gravières.

Dans le cas des scénarios 3 et 4, des échanges se produisent entre les gravières et la Garonne, par le biais des déversoirs d'équilibre. Le niveau d'eau atteint dans la Garonne dépasse la cote radier des déversoirs, déviant ainsi une partie du débit vers les gravières durant la pointe de crue. Il en résulte un léger abaissement des débits de pointe et des hauteurs maximums (en fonction de la surface exploitée).

Une partie du volume ainsi détourné ne retourne pas directement vers la Garonne. En effet, lors de l'abaissement du niveau de la Garonne en dessous de la cote radier des déversoirs d'équilibre, le volume restant dans les gravières est stocké. Ce volume d'eau retournera vers le cours d'eau par un transfert au travers de la nappe d'accompagnement. Il constitue une partie du volume d'écrêtement, contribuant à l'amortissement des crues (aplatissement de l'hydrogramme de crue).

### c) Conclusion

On retient donc que les faibles crues légèrement débordantes (qui sont également les plus fréquentes) :

- ne sont pas modifiées par la présence de gravières si elles n'atteignent pas les sites d'extraction,
- sont amorties en hauteur maximum et en débit maximum dans le cas où des déversoirs d'équilibre, s'il en existe, autorisent un déversement dès la montée de la crue.

### 6.2.3.2 Crue biennale

#### a) Analyse

On constate pour ce type de crue dont l'inondation est restreinte au lit moyen que :

- dans le cas des scénarios 1 et 2, il y a :
  - un abaissement des niveaux par rapport au scénario de référence (environ 0,01 à 0,04 m, soit 0,2 à 1,1 % de la montée du niveau de crue),
  - un stockage d'une partie non négligeable du volume de crue (1,0 à 1,8 Mm<sup>3</sup>, soit 0,5 à 0,8 % du volume total de crue)
  - une invariance du débit de pointe de la crue,
  - une invariance de la durée de crue.
- dans le cas des scénarios 3 et 4, il y a :
  - un abaissement des niveaux d'eau maximums quasiment similaire à l'abaissement constaté pour les scénarios 1 et 2,
  - un stockage d'une partie du volume de crue (0,7 à 1,2 Mm<sup>3</sup>, soit 0,3 à 0,5 % du volume total de crue), ces volumes étant inférieurs aux volumes stockés dans le cas d'une crue biennale avec déversoir d'équilibre mais similaires aux volumes stockés dans le cas d'une crue annuelle avec déversoir d'équilibre,
  - une invariance du débit de pointe de la crue,
  - une invariance de la durée de crue.

## **b) Interprétation**

Dans le cas des scénarios 1 et 2, le niveau de la Garonne est monté suffisamment haut pour qu'un débordement généralisé par-dessus la cote du terrain naturel se produise. En conséquence, les gravières qui n'étaient pas concernées par la crue annuelle sont maintenant sollicitées par les débordements. Une importante partie du volume de crue est directement déversée vers les sites d'extraction durant la montée des eaux. Ces déversements se produisent durant la pointe de crue, ce qui explique la variation constatée sur les hauteurs maximums. Cette variation relativement faible n'est pas perceptible sur les valeurs de débits.

Lors de la décrue, les volumes déversés restent piégés dans les gravières sans pouvoir retourner directement vers la Garonne. Les gravières du lit moyen sont alors totalement remplies et leur vidange au travers de la nappe est différée dans le temps. L'amortissement de la crue, bien qu'il n'apparaisse pas de façon significative sur la durée et le débit de pointe, est vérifié sur les hauteurs maximums et les volumes d'écrêtement.

Dans le cas des scénarios 3 et 4, l'amortissement des crues, encore non significatif sur la durée de crue et le débit de pointe, est réalisé par l'écrêtement d'une partie du volume de crue. Ce volume est moins important que dans le cas des scénarios 1 et 2 de la crue biennale car la présence des déversoirs d'équilibre abaisse la cote de vidange des sites d'extraction. En conséquence, une partie non négligeable des volumes déversés en début de crue vers les gravières retourne directement à la Garonne pendant la décrue, jusqu'à ce que le niveau atteigne la cote radier des déversoirs d'équilibre.

L'égalité des volumes stockés dans le cadre des scénarios 3 et 4 pour la crue annuelle et la crue biennale, signifie que pour ces deux crues, les gravières ont été pleinement sollicitées par la montée des eaux. Cette valeur de volume stocké correspond au volume maximum qui peut être stocké dans les gravières du lit moyen équipées d'un déversoir d'équilibre.

## **c) Conclusion**

On retient donc que dans le cas des crues biennales, pour lesquelles un débordement généralisé vers les sites d'extraction se produit :

- un amortissement est constaté à partir de l'analyse des hauteurs de submersion ainsi que des volumes d'écrêtement, ces derniers étant fonction de la cote de vidange,
- les crues ne sont pas modifiées de façon significative dans leurs débits de pointe ni dans leur durée,

### 6.2.3.3 Crue décennale

#### a) Analyse

Seuls les scénarios 1 et 2 de la crue décennale ont été comparés au scénario de référence. En effet, pour des crues décennales ou supérieures, les déversoirs d'équilibre sont noyés sous les écoulements du lit mineur. Leurs effets sur les débits et hauteurs de pointes ne sont alors plus significatifs sur le passage d'une crue.

Pour ces deux scénarios, les simulations de la crue décennale permettent de constater :

- un abaissement généralisé des niveaux d'eau maximums (0,03 à 0,09 m soit 0,5 à 1,7 % de la hauteur d'amplitude de la crue) dans le lit majeur non endigué ainsi que dans les casiers hydrauliques,
- une augmentation du volume stocké en fin de crue (de 3,1 à 6,0 Mm<sup>3</sup> supplémentaire soit 0,7 à 1,3 % du volume de crue),
- une diminution du débit de pointe (de 30 m<sup>3</sup>/s environ, soit 1,0 % du débit de pointe),
- une invariance de la durée de crue.

#### b) Interprétation

L'augmentation de la capacité de stockage entre le scénario 0 et le scénario 1 puis entre le scénario 0 et le scénario 2 est plus forte dans le cas de la crue décennale que dans le cas de la crue biennale. Cette variation s'explique par la contribution des gravières de lit majeur bas au stockage :

- dans le cas du scénario 1, l'augmentation du stockage est de 3,1 Mm<sup>3</sup>, soit 1,0 Mm<sup>3</sup> dans le lit moyen (évalué lors de la crue biennale au scénario 1) plus 2,1 Mm<sup>3</sup> dans le lit majeur bas,
- dans le cas du scénario 2, l'augmentation du stockage est de 6,0 Mm<sup>3</sup>, soit 1,8 Mm<sup>3</sup> dans le lit moyen (évalué lors de la crue biennale au scénario 2) plus 4,2 Mm<sup>3</sup> dans le lit majeur.

Qu'ils soient localisés dans le lit moyen ou dans le lit majeur bas, les sites d'extraction, accentuent l'amortissement de la crue par l'augmentation de la capacité de stockage globale du fond de vallée. En effet, le remplissage des gravières se fait dès leur submersion par les débordements du cours d'eau, puis leur vidange ne peut s'effectuer qu'en différé par transfert au travers de la nappe.

Cette condition est vérifiée dans la mesure où la montée de crue de la Garonne, relativement brève en quelques jours, est plus rapide que la remontée de la nappe (ce qui est le cas usuellement).

L'abaissement des niveaux d'eau maximums s'explique par l'augmentation de la capacité de stockage du lit majeur bas liée au creusement des gravières dont le niveau initial avant remplissage (début de crue) a été fixé à une valeur inférieure à la cote du terrain naturel.

L'amortissement de la crue est également vérifié par l'analyse des débits de pointe. En effet, le stockage d'une partie des volumes de crue durant sa traversée de la zone d'étude, écrête de façon significative le pic du débit de crue.

### c) Conclusion

On retient donc, que dans le cas des crues décennales pour lesquelles, le débordement inonde le lit moyen puis le lit majeur bas par débordement généralisé de la Garonne :

- un amortissement est vérifié à partir de l'analyse du volume d'écrêtement, ce dernier étant d'autant plus important que la superficie exploitée du lit majeur est importante,
- cet amortissement est constaté sur les hauteurs maximums et sur les débits de pointe durant le pic de crue,
- l'amortissement de la crue par les gravières n'est pas significatif sur la durée de la crue.

## 6.2.3.4 Crue centennale

### a) Analyse

Comme dans le cas de la crue décennale, les déversoirs d'équilibre interviennent en tout début de crue dans le cas d'un événement centennale. Leurs effets ne sont donc pas visualisables. En conséquence, seul les scénarios 1 et 2 ont été étudiés.

Pour ces scénarios, on constate :

- un abaissement généralisé des niveaux d'eau maximums (de 0,03 à 0,21 m soit 0,3 à 3,0 % de la hauteur d'amplitude de la crue) dans le lit majeur non endigué ainsi que dans les casiers hydrauliques,
- une augmentation du volume stocké en fin de crue (de 8,3 à 17,1 Mm<sup>3</sup> soit de 1,0 à 2,1 % du volume de crue),
- un abaissement du débit de pointe (de 50 à 130 m<sup>3</sup>/s, soit 1,1 à 2,8 % du débit total)
- une invariance de la durée de crue.

## b) Interprétation

L'augmentation de la capacité de stockage entre le scénario 0 et le scénario 1 puis entre le scénario 0 et le scénario 2 est plus forte dans le cas de la crue centennale que dans le cas de la crue décennale. Cette variation s'explique par la contribution des gravières de lit majeur haut au stockage :

- dans le cas du scénario 1, le stockage est de 8,3 Mm<sup>3</sup>, soit 3,1 Mm<sup>3</sup> dans le lit majeur bas et le lit moyen (évalué lors de la crue décennale au scénario 1) plus 5,2 Mm<sup>3</sup> dans le lit majeur haut,
- dans le cas du scénario 2, le stockage est de 17,1 Mm<sup>3</sup>, soit 6,0 Mm<sup>3</sup> dans le lit majeur bas et le lit moyen (évalué lors de la crue décennale au scénario 2) plus 11,1 Mm<sup>3</sup> dans le lit majeur haut.

Qu'ils soient localisés dans le lit moyen, dans le lit majeur bas ou dans le lit majeur haut, les sites d'extraction accentuent l'amortissement de la crue par l'augmentation de la capacité de stockage globale du fond de vallée. En effet, les gravières se remplissent par les débordements du cours d'eau, puis leur vidange ne peut s'effectuer qu'en différé par transfert au travers de la nappe.

L'abaissement des niveaux d'eau maximums s'explique par l'augmentation de la capacité de stockage du lit majeur liée au creusement des gravières dont le niveau initial avant remplissage (début de crue) a été fixé à une valeur inférieure à la cote du terrain naturel.

L'amortissement de la crue est également vérifié par l'analyse des débits de pointe. En effet, le stockage d'une partie des volumes de crue, écrête de façon significative le pic du débit de crue.

## c) Conclusion

On retient donc que dans le cas des crues centennales pour lesquelles, le débordement inonde le lit moyen puis le lit majeur par débordement généralisé de la Garonne :

- un amortissement est vérifié à partir de l'analyse du volume d'écrêtement, l'augmentation de ce dernier par rapport à la crue décennale correspond au remplissage des gravières situées en limite de zone inondable,
- cet amortissement est constaté sur les hauteurs maximums ainsi que sur les débits de pointes durant le pic de crue,
- aucun effet significatif n'est constaté sur la durée de la crue.

## 6.2.4 Synthèse des effets constatés sur le secteur en aval de Toulouse

La modélisation des différents scénarios d'aménagement sur le secteur en aval de Toulouse a permis de constater que les gravières ont pour effet un amortissement général des crues.

Cet amortissement est principalement constaté sous la forme de l'augmentation des volumes de crue stockés en lit moyen ou en lit majeur (bas et haut). Ces volumes stockés sont relativement importants et conduisent à un amortissement (particulièrement lors des crues fortes) constaté sur les hauteurs maximums d'eau et les débits de pointes. Les gravières agissent donc de façon similaire à des ouvrages d'écrêtement de crue.

Cet amortissement peut également se traduire par le retardement du pic de crue, bien qu'il ne soit pas systématique : le retard est constaté sur les crues annuelle, décennale et centennale, parce qu'il y a concomitance du remplissage des gravières de lit moyen ou majeur avec le pic de crue (voir hydrogrammes en Annexe 4, retard inférieur à 5 heures).

Pour aucune des simulations, la durée de la crue n'a été modifiée de façon significative par la mise en place de gravière.



## 6.3 Essais d'extrapolation des résultats

### 6.3.1 Introduction

Les volumes de stockage écrêtant les crues ont été évalués en supposant que :

- la nappe se trouve à l'équilibre avec le niveau de la Garonne avant le début de la crue,
- les remontées de nappe se font beaucoup plus lentement que les débordements de la Garonne.

Ainsi, le vide laissé entre la surface libre de la gravière et la cote de déversement constitue le volume maximum de stockage durant la crue.

Une approche simplifiée de ce volume a été faite à partir du calcul d'une hauteur moyenne de remplissage des sites d'extraction situés dans les différentes unités morphologiques du fond de vallée.

$$H_{\text{moy}} = \frac{\text{Volume stocké}}{\text{Surface exploitée}}$$

A partir de cette hauteur moyenne, il est ensuite possible d'évaluer simplement dans quelles mesures l'exploitation du fond de vallée profite à l'écrêtement des crues de la Garonne, en fonction de la surface du fond de vallée et de sa densité de la surface exploitée.

$$\text{Volume stocké} = H_{\text{moy}} \times \text{Surface exploitée}$$

ou encore

$$\text{Volume stocké} = H_{\text{moy}} \times \text{Surface totale} \times \text{densité d'exploitation}$$

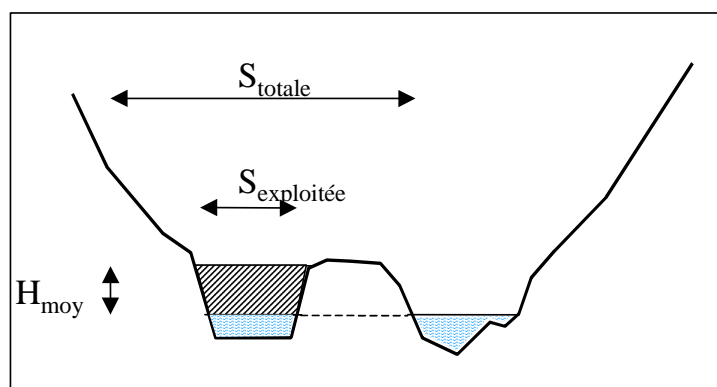


Figure 6 Volume stocké dans les gravières

## 6.3.2 Secteur de Marmande

### 6.3.2.1 Calcul des hauteurs moyennes

Les rapports entre volume stocké et surface exploitée donnent les valeurs suivantes :

CALCUL POUR LA CRUE BIENNALE		
	scénario 1	scénario 2
Volume stocké en lit moyen (m <sup>3</sup> )	1 000 000	1 400 000
Surface exploitée en lit moyen (m <sup>2</sup> )	510 000	772 500
Hauteur moyenne (m)	1,96	1,81
Valeur retenue (m)	2,0	
CALCUL POUR LA CRUE DECENNALE ET CENTENNALE		
	scénario 1	scénario 2
Volume stocké en lit majeur (m <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup>	1 200 000	3 200 000
Surface exploitée en lit majeur (m <sup>2</sup> )	340 000	1 345 000
Hauteur moyenne (m)	3,53	2,38
Valeur retenue (m)	3,0	

(<sup>1</sup>) : le volume stocké en lit majeur durant la crue centennale correspond au volume stocké total moins le volume maximum stocké en lit moyen calculé dans le cadre de la crue biennale.

Tableau 7 Hauteur moyenne de stockage dans le fond de vallée sur la zone de Marmande

Dans le cas du lit moyen, les valeurs de hauteurs sont relativement proches l'une de l'autre. La disparité des hauteurs moyennes de stockage dans le lit majeur provient de la variabilité spatiale du niveau du terrain naturel qui le constitue.

### 6.3.2.2 Extrapolation

Le linéaire étudié correspond à 15 km (de Fourques à Couthures). Le linéaire assimilable à ce type de fond de vallée est de 60 km (de la confluence Garonne-Baïse à la confluence Garonne-Dropt, voir paragraphe 3.3.1 page 22).

En appliquant les relations du paragraphe 6.3.1 page 57, il est possible de faire les évaluations suivantes sur 60 km de linéaire :

	scénario 1	scénario 2
lit moyen de 46 000 000 m <sup>2</sup>	exploité à 4,4 %	exploité à 6,7 %
lit majeur de 122 000 000 m <sup>2</sup>	exploité à 1,1 %	exploité à 4,4 %
volume stocké en lit moyen seul	4 000 000 m <sup>3</sup> , soit 0,4 % du volume de crue biennale	6 200 000 m <sup>3</sup> , soit 0,6 % du volume de crue biennale
volume stocké en lit moyen plus lit majeur	8 100 000 m <sup>3</sup> , soit 0,4 % du volume de la crue décennale, soit 0,2 % du volume de la crue centennale	11 500 000 m <sup>3</sup> , soit 0,5 % du volume de crue décennale soit 0,3 % du volume de crue centennale

Tableau 8 Volume d'écrêtement de crue sur le secteur de Marmande

*Remarque : afin de prendre en compte les apports latéraux sur le linéaire faisant l'objet de l'extrapolation, les comparaisons en pourcentage de volume ont été réalisées à partir du volume de crue à l'aval du linéaire considéré (évolution du volume proportionnelle  $S^0$ ,<sup>8</sup> où  $S$  est la surface drainée).*

On retient alors que les gravières du secteur de Garonne situées entre la Baïse et le Dropt, contribuent à l'amortissement des crues de la Garonne en augmentant le volume de stockage lors des débordements. Cependant, le faible pourcentage que ce volume représente par rapport au volume total de crue, illustre la raison pour laquelle les autres effets (abaissement de la ligne d'eau, diminution du débit de pointe, réduction de la durée de la crue) ne sont pas significatifs.

### 6.3.3 Secteur en aval de Toulouse

#### 6.3.3.1 Calcul des hauteurs moyennes

Les rapports entre volume stocké et surface exploitée donne les valeurs suivantes :

CALCUL POUR LA CRUE BIENNALE		
	scénario 1	scénario 2
Volume stocké en lit moyen (m <sup>3</sup> )	1 000 000	1 800 000
Surface exploitée en lit moyen (m <sup>2</sup> )	283 750	567 500
Hauteur moyenne (m)	3,52	3,17
Valeur retenue (m)	3,3	
CALCUL POUR LA CRUE DECENNALE		
	scénario 1	scénario 2
Volume stocké en lit majeur (m <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup>	2 100 000	4 200 000
Surface exploitée en lit majeur bas (m <sup>2</sup> )	491 000	982 000
Hauteur moyenne (m)	4,28	4,28
Valeur retenue (m)	4,3	
CALCUL POUR LA CRUE CENTENNALE		
	scénario 1	scénario 2
Volume stocké en lit majeur (m <sup>3</sup> ) <sup>(2)</sup>	5 200 000	11 100 000
Surface exploitée en lit majeur haut (m <sup>2</sup> )	1 072 500	2 145 000
Hauteur moyenne (m)	4,84	5,17
Valeur retenue (m)	5,0	

<sup>(1)</sup> : le volume stocké en lit majeur bas durant la crue décennale correspond au volume stocké total moins le volume maximum stocké en lit moyen calculé dans le cadre de la crue biennale.

<sup>(2)</sup> : le volume stocké en lit majeur haut durant la crue centennale correspond au volume stocké total moins le volume maximum stocké en lit majeur bas calculé dans le cadre de la crue décennale moins le volume maximum stocké en lit moyen calculé dans le cadre de la crue biennale.

Tableau 9 Hauteur moyenne de stockage dans le fond de vallée sur la zone en aval de Toulouse

### 6.3.3.2 Extrapolation

Le linéaire étudié correspond à 20 km (de Gagnac à Grisolles). Le linéaire assimilable à ce type de fond de vallée est de 60 km (de l'aval de Toulouse à l'amont de Castelsarrasin, voir paragraphe 3.3.2 page 24).

En appliquant les relations du paragraphe 6.3.1 page 57, il est possible de faire les évaluations suivantes sur 60 km de linéaire :

	scénario 1	scénario 2
lit moyen de 16 300 000 m <sup>2</sup>	exploité à 5,2 %	exploité à 10,5 %
lit majeur bas 61 200 000 m <sup>2</sup>	exploité à 2,4 %	exploité à 4,8 %
lit majeur haut 106 800 000 m <sup>2</sup>	exploité à 3,0 %	exploité à 6,0 %
volume stocké en lit moyen seul	2 793 000 m <sup>3</sup> , soit 0,6 % du volume de crue biennale	5 639 000 m <sup>3</sup> , soit 1,3 % du volume de crue biennale
volume stocké en lit moyen plus lit majeur bas	9 110 000 m <sup>3</sup> , soit 0,9 % du volume de la crue décennale	18 274 000 m <sup>3</sup> , soit 1,8 % du volume de crue décennale
volume stocké en lit moyen plus lit majeur bas plus lit majeur haut	27 370 000 m <sup>3</sup> , soit 1,5 % du volume de la crue centennale	54 795 000 m <sup>3</sup> , soit 3,0 % du volume de crue centennale

Tableau 10 Volume d'écrêtement de crue sur le secteur en aval de Toulouse

**Remarque :** afin de prendre en compte les apports latéraux sur le linéaire faisant l'objet de l'extrapolation, les comparaisons en pourcentage de volume ont été réalisées à partir du volume de crue à l'aval du linéaire considéré (évolution du volume proportionnelle  $S^{0,8}$  où  $S$  est la surface drainée).

Il faut noter que la valeur du volume stocké dans le cas d'une crue centennale est liée à la hauteur moyenne (5 m) séparant le niveau initial de la gravière (sensiblement le niveau de la nappe) et le terrain naturel. Une des hypothèses utilisée pour la modélisation suppose un gradient de nappe perpendiculaire à l'axe du fond de vallée nul (niveau de la nappe = niveau de la Garonne en régime hors crue). Cette hypothèse relativement forte, peut conduire à une surévaluation du volume stocké, si, dans la réalité la nappe s'écoule avec un faible gradient vers le cours d'eau. Il est aisé de corriger cette divergence, sachant que le volume stocké en lit majeur haut est proportionnel à la hauteur moyenne. Afin d'illustrer ce propos, on suppose que la hauteur moyenne est en réalité 4 m et non 5 m

- dans le cas du scénario 1, le volume stocké dans le lit majeur haut passe de 18,6 Mm<sup>3</sup> (= 27,37 Mm<sup>3</sup> au total – 9,11 Mm<sup>3</sup> en lit majeur bas et lit moyen), à 14,61 Mm<sup>3</sup> (= 4/5 x 18,6 Mm<sup>3</sup>), soit un total en lit moyen plus lit majeur haut et bas de 23,72 Mm<sup>3</sup>, soit encore 1,4 % du volume de crue centennale,

- dans le cas du scénario 2, le volume stocké dans le lit majeur haut passe de 36,52 Mm<sup>3</sup> (= 54,79 Mm<sup>3</sup> au total – 18,27 Mm<sup>3</sup> en lit majeur bas et lit moyen), à 29,22 Mm<sup>3</sup> (= 4/5 × 36,52 Mm<sup>3</sup>), soit un total en lit moyen plus lit majeur haut et bas de 47,49 Mm<sup>3</sup>, soit encore 2,8 % du volume de crue centennale

A partir des hypothèses proposées en début de ce rapport, on retient que les gravières du secteur de la Garonne situé entre Toulouse et Castelsarrasin, contribuent à l'amortissement des crues de la Garonne en augmentant le volume de stockage lors des débordements. Cependant, ce volume plus élevé que dans le cas du secteur de Marmande s'explique par des hauteurs entre la nappe et la surface du terrain naturel plus importantes. Le fond de vallée est en effet partiellement plus élevé (présence d'un lit majeur haut), ce qui augmente le volume stocké particulièrement dans le cas des crues exceptionnelles.

Bien que cet amortissement par les volumes de stockage apparaisse de façon significative sur les résultats numériques de la modélisation, les modifications de ligne d'eau et de débit restent quasiment imperceptibles lors du passage de la crue.



## Conclusion

Le présent rapport a été réalisé dans l'objectif de mieux cerner les effets éventuels des gravières implantées en zone inondable sur le régime d'écoulement de la Garonne en crue. Afin de concrétiser les éléments de recherche, deux modèles numériques ont été réalisés sur deux portions de 15 à 20 km du linéaire de Garonne :

- un modèle de la zone localisé en amont et en aval de la ville de Marmande (47) dans la partie aquitaine de la Garonne
- un modèle de la zone localisé en aval de la ville de Toulouse (31) dans la partie Midi-Pyrénées de la Garonne

Ces deux secteurs ont été choisis sur des critères géomorphologiques (représentativité de la structure du fond de vallée, mode d'inondation particulier) ainsi que sur des critères pratiques (existence de données bathymétriques et topographiques).

Des simulations pour différents types de crue (fréquentes à exceptionnelles) et différents états d'aménagements (sans gravière, densité de gravières actuelle, densité de gravières forte) ont été réalisées puis comparées.

Les simulations numériques ont été effectuées dans le cadre de l'étude sur la base de deux hypothèses fortes :

1. **Nombre de sites exploités en lit majeur** : deux scénarios ont été retenus :
  - Scénario 1 : représentatif de l'état d'exploitation actuel des portions de vallée modélisées,
  - Scénario 2 : ce scénario constitue une projection de ce que pourrait être la situation future, dans l'hypothèse – forte mais retenue à titre illustratif – où la surface exploitée est multipliée par 2 (aval de Toulouse), voire 2.5 (secteur de Marmande).  
Dans le cadre de cette hypothèse sur le secteur en aval de Toulouse, déjà fortement sollicité, la surface exploitée en lit majeur inondable serait de l'ordre de 6% ; elle serait de 5 % dans le cas de Marmande.

2. **Niveau initial des plans d'eau** : le niveau initial des plans d'eau sous la cote du terrain naturel au moment de l'inondation progressive du lit majeur conditionne directement le volume de crue stocké par la gravière.

Nous avons raisonné dans l'hypothèse où les niveaux initiaux des plans d'eau sont plutôt bas (de l'ordre 3 à 5 mètres en moyenne au-dessous de la cote du terrain naturel). Cette hypothèse est justifiée dans le cas où le niveau de nappe est bas et où la crue de la Garonne monte « rapidement » au regard du temps de réponse de la nappe, c'est à dire en quelques dizaines d'heures. Cette hypothèse, qui est tout à fait plausible, n'est cependant pas toujours vérifiée. Elle a cependant été retenue parce qu'elle va dans le sens d'une augmentation des volumes de stockages et donc des effets potentiels.

L'analyse des résultats de simulations des deux secteurs modélisés conduit à présenter la synthèse des constats du tableau ci-dessous :

Crue	fréquente	moyennement rare	rare	exceptionnelle	variation absolue	variation relative
<b>Volume d'écrêtement stocké</b>	augmentation sous certaines conditions <sup>(1)</sup>	augmentation systématique	augmentation systématique	augmentation systématique	1 à 55 Mm <sup>3</sup>	0,2 à 3,0 %
<b>Ligne d'eau</b>	abaissement sous certaines conditions <sup>(1)</sup>	abaissement	abaissement systématique	abaissement systématique	0,01 à 0,20 m	0,1 à 3,0 %
<b>Débit de pointe</b>	diminution sous certaines conditions <sup>(1)</sup>	diminution	diminution	diminution systématique	10 à 130 m <sup>3</sup>	0,1 à 2,8 %
<b>Durée de la crue</b>	aucun effet constaté	aucun effet constaté	aucun effet constaté	aucun effet constaté	0 heure	0 %
<b>Décalage du pic de crue</b>	légèrement retardé	légèrement retardé	retardé	retardé	5 à 10 heures	1 à 4 %

<sup>(1)</sup> : présence de déversoirs d'équilibre

Tableau 11 Tableau récapitulatif des différentes simulations

Les principales conclusions que l'on peut tirer de toutes les simulations effectuées sont les suivantes :

- les crues fréquentes dont l'inondation ne remonte pas jusqu'aux secteurs d'exploitation ne sont modifiées par la présence de gravières que sous l'hypothèse de mise en place de déversoirs d'équilibre destinés à provoquer les déversements vers les carrières en tout début de crue
- les effets de la mise en place de gravières dans les zones inondables des secteurs étudiés se traduisent généralement par une atténuation de la crue :
  - principalement perceptible sur l'accroissement des volumes d'écrêtements,
  - moins significative sur la ligne d'eau et les débits de pointe,
  - non constatée mais pressentie sur la durée de la crue.



- D'une manière générale on peut dire que les effets de l'implantation des sites d'extraction en lit majeur sur les crues, s'ils sont quantifiables à l'aide des modèles numériques développés dans le cadre de l'étude, ne sont pas perceptibles sur le terrain.  
On peut retenir que l'amplitude des modifications des principales grandeurs hydrauliques étudiées (volumes stockés, tirants d'eau, débits de pointe, temps de propagation...) est de l'ordre de 1% pour la situation actuelle, est de 2% au maximum dans la situation « projetée » (scénario 2).
- Les effets constatés peuvent être classés en deux groupes :
  - Effets « localisés » : parmi ceux-ci, la modification des cotes maximales en crue,
  - Effets « globaux », qui peuvent se faire sentir en aval : stockage de volumes de crue dans les plans d'eau, modification de la dynamique de la crue (accélération / ralentissement), diminution du débit de pointe.
- On remarquera de plus que tous les effets constatés dans le cadre des simulations peuvent être qualifiés de « positifs » au sens de la non aggravation des crues, locale ou globale :
  - La modification des cotes correspond toujours à un léger abaissement,
  - Les pics de crues peuvent être légèrement ralentis dans certains cas (en moyenne 1 cas sur 4) mais jamais accélérés,
  - Les débits de pointes du fleuve sont inchangés ou légèrement diminués,
  - Bien entendu, les volumes de crue en transit vers l'aval sont diminués des volumes restés dans les gravières.

En conclusion, dans toutes les situations étudiées il n'y a pas d'aggravation (surcotes, accélérations des pics...) des conditions de crues (on remarquera cependant que les merlons ceinturant éventuellement les sites, susceptibles de générer de légères surcotes locales, n'ont pas été représentés dans les modèles).

- On rappelle que les différents effets mis en évidence lors des simulations sont « amplifiés » par les hypothèses retenues (surfaces exploitées, niveaux initiaux dans les plans d'eau). Les ordres de grandeurs obtenus peuvent donc être considérés comme une « fourchette haute » d'évaluation de ces effets.  
Dans bien des cas, notamment lorsque les niveaux initiaux des plans d'eau seront plus hauts que ceux envisagés, les effets obtenus pour les crues modélisées seront de moindre amplitude, et donc encore moins perceptibles.

**Les résultats établis pour le présent rapport sont valables pour le type de cours d'eau considérés : grandes rivières de plaines, avec une zone inondable étendue de plusieurs kilomètres de large avec une montée de crue relativement rapide de quelques dizaines d'heures.**